

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Výstavba GePON s využitím programového  
prostředí Optiwave**

**Realization GePON using software Optiwave**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Olomouci 5. 5. 2011

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petrovi Koudelkovi za vedení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Optiwave za užitečný softwarový nástroj OptiSystem 9.0 a za jeho licenci.

V Olomouci 5. 5. 2011

## **Abstrakt**

Tato Diplomová práce je zaměřená na oblast optoelektroniky. Konkrétně se jedná o pasivní optické sítě (PON), se zaměřením na gigabitové ethernetové pasivní optické sítě (GePON). Cílem práce je uvést čtenáře do problematiky takovýchto sítí a jejich návrh.

Po popisu jednotlivých technologií se práce dále věnuje pouze technologii GePON. Osvětlením návrhu na modelových situacích se dostáváme k praktické části. V ní je realizováno čtrnáct různých zapojení sítě v programovém prostředí Optiwave 9.0 s přihlédnutím na hodnoty z praxe. Dalším bodem je realizace stejné sítě v laboratoři.

Poslední část je věnována výsledkům a rozboru simulovaného a reálného návrhu sítě GePON. V závěru práce je na základě výsledků zhodnocen rozdíl mezi návrhem a provozem sítí.

## **Klíčová slova**

Optoelektronika, PON, GePON, Optiwave.

## **Abstract**

This Master thesis is focused on optoelectronics. Specifically, it deals with the passive optical network (PON), with a target on the gigabit ethernet passive optical network (GePON). The aim is to introduce to the readers the problems of such networks and their applications.

After describing the various technologies, the thesis is then dealing with GePON technology only. Through explaining design for scenarios come to the practical part. It is implemented in fourteen different networks involved in the programming environment Optiwave 9.0 considering the value of practice. Another point is the realization of the same network in the laboratory.

The last part is devoted to the results and analysis of simulated and real network design GEAPON. The conclusion is based on the results evaluated the difference between the design and operation of networks.

## **Keywords**

Optoelectronics, PON, GePON, Optiwave.

## Obsah

<b>Úvod</b> .....	1
<b>1. Optická přístupová síť</b> .....	3
1.1 Stavební bloky optické přístupové sítě .....	4
1.2 Varianty přípojek dle umístění .....	5
1.3 Topologie sítí .....	7
1.3.1 Topologie P-to-P .....	7
<b>2. Pasivní optická síť</b> .....	10
2.1 Typy PON sítí .....	10
2.1.1 APON .....	10
2.1.2 GPON .....	11
2.2 Technologie sdílení přenosového média .....	12
2.2.1 TDM .....	13
2.2.2 FDM .....	13
2.2.3 WDM .....	13
<b>3. Ethernet PON</b> .....	14
3.1 GEPON .....	14
3.2 Návrh GEPON sítí .....	15
3.3 Modelové situace .....	17
<b>4. Specifikace a konfigurace prvků v měření</b> .....	22
4.1 Pasivní prvky v síti .....	22
4.2 Měřicí přístroje .....	23
4.3 Konfigurace měřicích přístrojů .....	25
4.4 Konfigurace a specifikace OLT .....	26
4.4.1 SFP Modul .....	27
4.5 Specifikace ONU jednotky .....	28

<b>5. Programové prostředí Optiwave .....</b>	<b>29</b>
5.1 OptiSystem 9.0 .....	29
<b>6. Naměřené a simulované hodnoty včetně rozboru .....</b>	<b>32</b>
6.1 Schémata měřených sítí.....	32
6.2 Naměřené výsledky .....	35
6.3 Měření v OptiSystem .....	36
6.4 Měření RFC 2544.....	39
<b>7. Závěr .....</b>	<b>41</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Základní stavební bloky sítě. ....	4
Obr. 2: FTTx. ....	6
Obr. 3: Rozdělení sítě. ....	7
Obr. 4: P-to-P Jednosměrný ....	8
Obr. 5: P-to-P obousměrný ....	8
Obr. 6: P-to-MP ....	9
Obr. 7: Struktura GEM rámce. ....	11
Obr. 8: Provoz GEAPON směr k účastníkovi. ....	14
Obr. 9: Provoz GEAPON směr do sítě. ....	15
Obr. 10: Rozložení délek PON sítě. ....	16
Obr. 11: FTTB pro zástavbu panelovými domy. ....	18
Obr. 12: Možná realizace FTTB. ....	18
Obr. 13: FTTO pro větší firmu/komplex. ....	19
Obr. 14: Možná realizace FTTO. ....	19
Obr. 15: FTTC skupina rodinných domů/menší vesnice. ....	20
Obr. 16: Možná realizace FTTC. ....	21
Obr. 17: Zapojení měřicího systému. ....	24
Obr. 18: SFP modul FTM-9712S-SL20. ....	27
Obr. 19: ONU AT-ON1000. ....	28
Obr. 20: Ukázka zapojení v programu OptiSystem 9.0. ....	31
Obr. 21: Měření č. 1. ....	32
Obr. 22: Měření č. 2. ....	32
Obr. 23: Měření č. 3. ....	32
Obr. 24: Měření č. 4. ....	33
Obr. 25: Měření č. 5. ....	33
Obr. 26: Měření č. 6. ....	33
Obr. 27: Měření č. 7. ....	33
Obr. 28: Měření č. 8. ....	33
Obr. 29: Měření č. 9. ....	33
Obr. 30: Měření č. 10. ....	34
Obr. 31: Měření č. 11. ....	34



Obr. 32: Měření č. 12. ....	34
Obr. 33: Měření č. 13. ....	34
Obr. 34: Měření č. 14. ....	34
Obr. 35: Měřič výkonu (měření č.1 strana ONU). ....	37
Obr. 36: Spektrum vyslaného a přijatého signálu. ....	38
Obr. 37: Spektrum přijatého signálu (1310 nm a 1490 nm).....	38
Obr. 38: a) detektor u OLT.    b) detektor u ONU. ....	39

## Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Porovnání různých variant PON.</i>	12
<i>Tab. 2: Typické útlumové hodnoty splittrů.</i>	17
<i>Tab. 3: FTTO útlumová kalkulace.</i>	20
<i>Tab. 4: FTTC útlumová kalkulace.</i>	21
<i>Tab. 5: Útlum použitých tras.</i>	22
<i>Tab. 6: Útlum použitých rozbočovačů.</i>	23
<i>Tab. 7: Vlastnosti FTM-9712S-SL20.</i>	28
<i>Tab. 8: Naměřené výsledky.</i>	35
<i>Tab. 9: Průběh útlumu trasou (směr k ONU) pro měření 1.</i>	37
<i>Tab. 10: Průběh útlumu trasou (směr k OLT) pro měření 1.</i>	37
<i>Tab. 11: Test RFC 2544 (Měření 1).</i>	40

## Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na optické sítě. Optické sítě jsou přímým následníkem sítí metalických a předpokládá se, že v následujících letech bude většina metalického vedení nahrazena optickými spoji. Jelikož metalické vedení se svými přenosovými možnostmi již nedostačuje dnešním požadavkům, bylo nutné obrátit se na jiné přenosové médium. Tímto médiem je optické vlákno, které pro přenos signálu využívá světlo. Světlo je nejrychlejší známá veličina (299 792 458 m/s ve vakuu). Díky této rychlosti, dodržením nejpřísnějších podmínek pro čistotu vláken a správné modulaci, je možné dosáhnout přenosových rychlostí čítající až 10ky Gbit/s.

Optické sítě jsou dále specifikovány a rozděleny. Práce se zabývá především technologií pasivních optických sítí, konkrétně Gigabitovými ethernetovými pasivními sítěmi. A to jejich základním popisem a jejich návrhem. V praktické části jsou sítě navrženy, simulovány (OptiSystem 9.0) a realizovány v laboratoři. Dále je uvedena struktura práce ve formě obsahu jednotlivých kapitol.

První kapitola vysvětluje, co je optická síť, z čeho je složena a jak se jednotlivé prvky v síti jmenují a jaké mají základní vlastnosti. Dále zde máme síť rozloženou na bloky a popis těchto bloků. Rozdělení dle umístění koncové jednotky. Závěr kapitoly je věnován základnímu rozdělení topologií optických sítí.

V druhé kapitole je blíže popsána problematika pasivních optických sítí. Zde se zabýváme topologií takovýchto sítí a jejich typy. Jsou zde uvedeny základní typy, tedy APON, BPON, GPON a jejich porovnání. Tato kapitola je uzavřena technologiemi, pomocí kterých se v optických sítích sdílí optické vlákno.

Třetí kapitola je věnována technologii ethernet PON. Nejprve zde osvětlujeme technologii EPON a dále se blíže věnujeme Gigabit EPON. Poté přistupujeme k návrhu takovýchto sítí a na třech modelových situacích je postup vysvětlen.

Jelikož bylo měřeno různými metodami a různými přístroji, je ve čtvrté kapitole uvedena specifikace a konfigurace některých z nich. Dále se blíže seznamujeme s koncovou uživatelskou jednotkou a se zapojením a vlastnostmi vysílače na straně sítě.

Programové prostředí Optiwave je náplní páté kapitoly. Jsou zde zmiňovány různé typy programů, patřící pod Optiwave. Převážná část se však věnuje simulačnímu programu

Optiwave, ve kterém probíhaly simulační zapojení. Uveden je také nástin konfigurace v tomto programu.

Šestá kapitola obsahuje všechna schémata měření, dále naměřené hodnoty, jak ze simulačního, tak z reálného měření. Dále je věnována metodologii měření doplněnou o rozbor některých hodnot a konkrétních grafů ze simulací.

Závěrečná kapitola je shrnutím celé práce s přihlédnutím na dosažené výsledky a zhodnocením tématu samého.

## 1. Optická přístupová síť

Přístupová síť je druh sítě mezi poskytovatelem a zákazníkem. Tato síť byla do nedávna řešena metalickým vedením. V dnešní době je tendence přecházet na vedení optické, z důvodu navýšení rychlosti. S optickou sítí je možné ke koncovým bodům sítě dovést informaci rychlostí až stovek Mbit/s. V případě nahrazení metalického vedení, optickým se jedná o optickou přístupovou síť OAN (Optical Access Network).

Sdělovací síť obecně je tvořena vysílačem, médiem, prvky na trase a přijímačem. U optických sítí je vysílačem zdroj záření, médiem optický vlnovod a přijímačem detektor optického záření. Prvky na trase jsou různé například splittry, couplery, konektory, optické regenerátory a jiné.

Základními zdroji v oblasti optoelektroniky jsou LD (Laser Diod) a LED (Light Emitting Diod). Zde je využíváno PN přechodu a to v propustném směru. Záření ve formě fotonu je docíleno rekombinací elektronů a děr.

Jako detektoru je využito také PN přechodu, ovšem v závěrném směru. Přesnost detektoru je velice důležitá, určuje celkovou výkonnost systému. V principu pouze mění optický signál na elektrický, skládá se z přijímače a obvodu pro zpracování signálu. Požadavky jsou především, velká citlivost v pracovní oblasti, velká věrnost konverze signálu, velká odezva na optický signál, velká rychlost a dostatečná šířka pásma, malý šum, stabilita a nízké pracovní napětí.

Optický vlnovod neboli optické vlákno je jako světlovod využíván od roku 1970, ovšem s dnešními vlákny se nedá srovnávat. Optická vlákna se vyrábějí především jako plastová a křemenná ( $\text{SiO}_2$ ). Při výrobě jsou kladeny velké požadavky na přesnost. Jejich útlum totiž určuje rychlost a vzdálenost celé sítě. Jsou známy dva typy vláken jednomódové (SM) a multimódové (MM), dále se různě mění index lomu jádra a obalu a dle toho profil a vlastnosti vlákna. Pro příklad uvádím důležité hodnoty hojně užívaného vlákna, kterým je SM vlákno G.652.D: útlum 0,34 dB/km (1310 nm), disperze 3,5 ps/nm\*km (1310 nm), PMD 0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ , MFD  $9,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$ .

## 1.1 Stavební bloky optické přístupové sítě

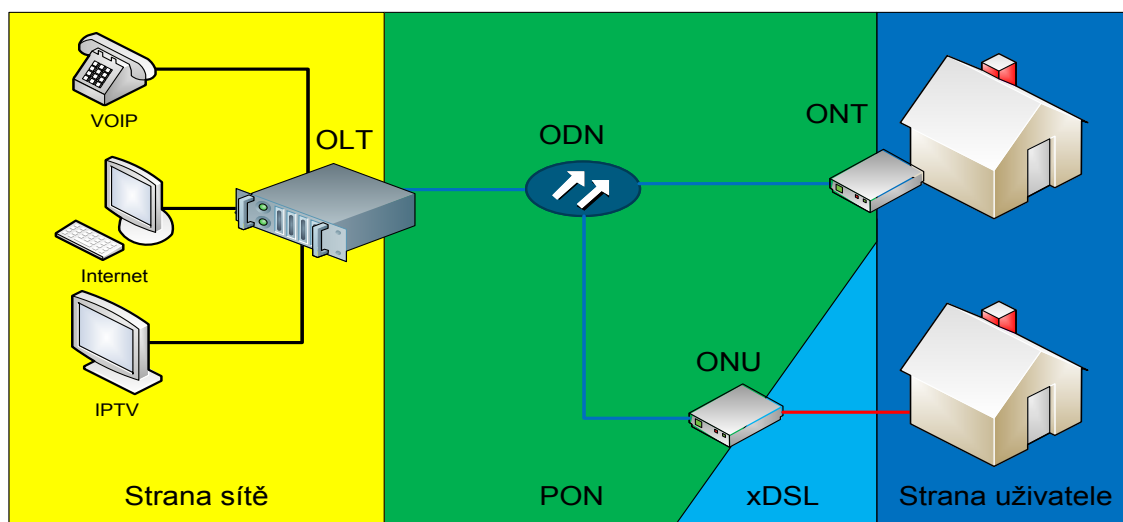
Optické sítě můžeme rozdělit do funkčních bloků. Rozlišujeme čtyři základní druhy, kterými jsou ONU, ONT, OLT a ODN. Ty nám pokrývají celý prostor přístupové sítě bez znalosti jakýkoliv technických předpokladů sítě (viz. obr. 1):

ONU (Optical Network Unit - Optická síťová jednotka), jde o zařízení na konci optické sítě, které zabezpečuje funkce pro převod optické a metalické či bezdrátové sítě. Jedná se o zařízení umístěné na straně koncového účastníka, které může spolupracovat s různými technologiemi a s různým počtem uživatelů.

ONT (Optical Network Termination - Optické síťové zakončení), jde o zařízení podobně jako u ONU na konci optické sítě. V tomto případě se jedná o propojení optické přístupové sítě a konkrétního rozhraní (lokální sítě).

OLT (Optical Line Termination - Optické linkové zakončení), jde o zařízení propojující patřetí síť a přístupovou síť. OLT je zakončení distribuční sítě na straně poskytovatele. Mimo jiné řídí a dohlíží nad jednotkami ONT a ONU.

ODN (Optical Distribution Network - Optická distribuční síť), jde o část sítě mezi optickým linkovým zakončením OLT a jednotkami ONU, ONT. V této části jsou umístěny přenosové prvky, které se podílejí na útlumu trasy (splittery, vlákna, sváry, konektory, atd.).



Obr. 1: Základní stavební bloky sítě.

## 1.2 Varianty přípojek dle umístění

Pojem, který nazýváme FTTx (Fiber to the x) nám určuje, ve kterém místě je ukončena vlastní optická síť a přímo navazuje na metalické vedení (viz. obr. 2). Tedy kde se nachází účastnická jednotka Onu. Nejčastěji rozlišujeme tyto typy:

FTTH (Fiber to the home), optické vlákno dosahuje ke koncovým bodům sítě. Je tedy přivedeno přímo do obytného prostoru účastníka.

FTTO (Fiber to the office), optické vlákno dosahuje k důležitým místům sítě. Tedy do kanceláří, kde je vyžadována velká přenosová kapacita.

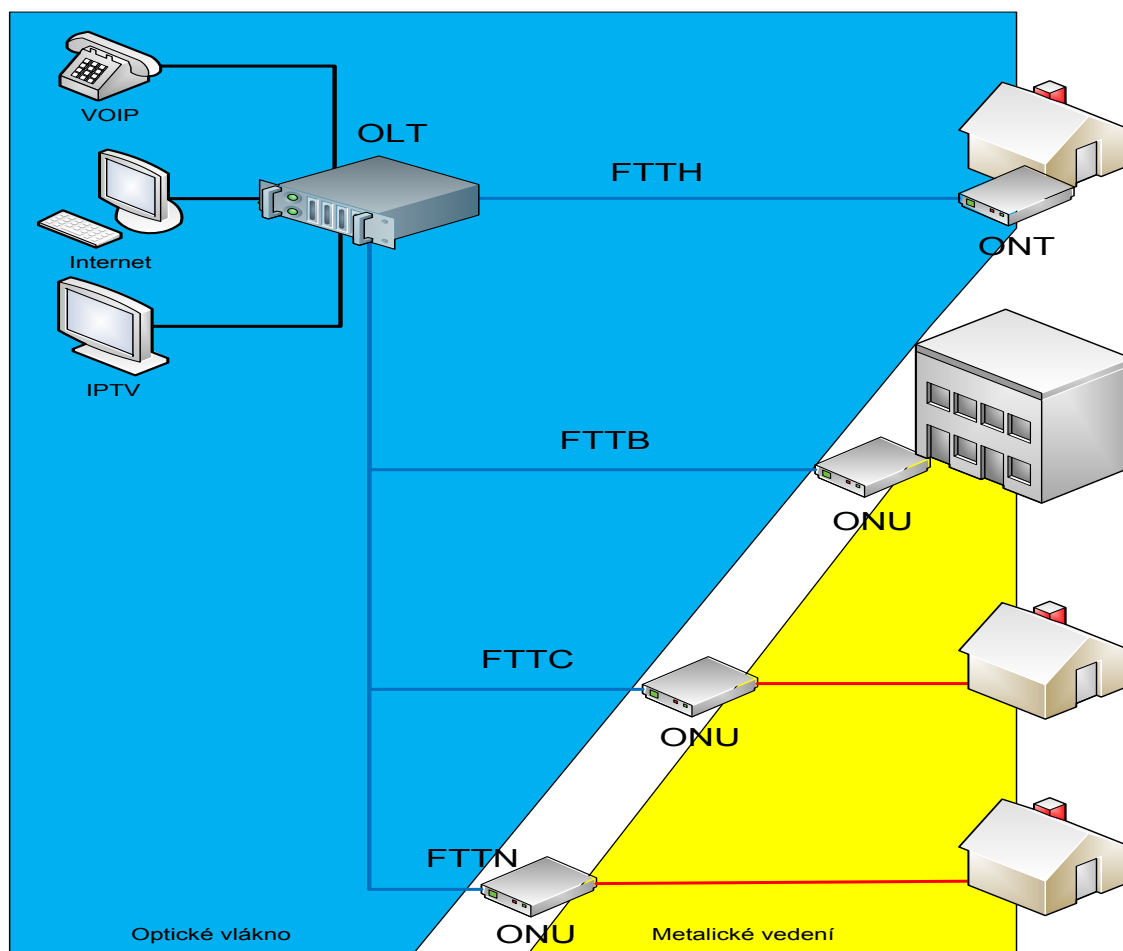
FTTB (Fiber to the building), optické vlákno dosahuje hranice budovy. Toto umístění se používá především v panelových domech, kde optická síť končí vně budovy a dále je rozvedena pomocí stávajících rozvodů.

FTTCab (Fiber to the cabine), optické vlákno je dosahuje do rozvaděčové skříně, která je umístěna typicky několik set metrů od jednotlivých účastníků. Zde je pomocí kroucené dvojlinky anebo koaxiálního kabelu připojen každý účastník zvlášť.

FTTC (Fiber to the curb), optické vlákno dosahuje k okraji chodníku z tohoto místa je podobně jako u FTTCab rozveden signál dále.

FTTP (Fiber to the premises), optické vlákno dosahuje prostoru účastníka. Tento pojem zahrnuje připojení typu FTTB a FTTH. Tedy je využíván jako souhrnný název například pro skupinu domů (FTTH) a firmu (FTTB).

FTTN (Fiber to the node), optické vlákno dosahuje do rozvaděčové skříně. Toto řešení zahrnuje i FTTCab, ale typicky je rozvaděč umístěn více než kilometr od jednotlivých účastníků.



Obr. 2: FTTx.

Některé rozdělení optických přístupových sítí na sebe úzce navazuje nebo je téměř stejné. Například FTTP zahrnuje jak FTTH, tak FTTB. Dále by se dalo říci, že FTTN, FTTC a FTTCab jsou totožné. Liší se v různosti vzdáleností ONU od účastníka.

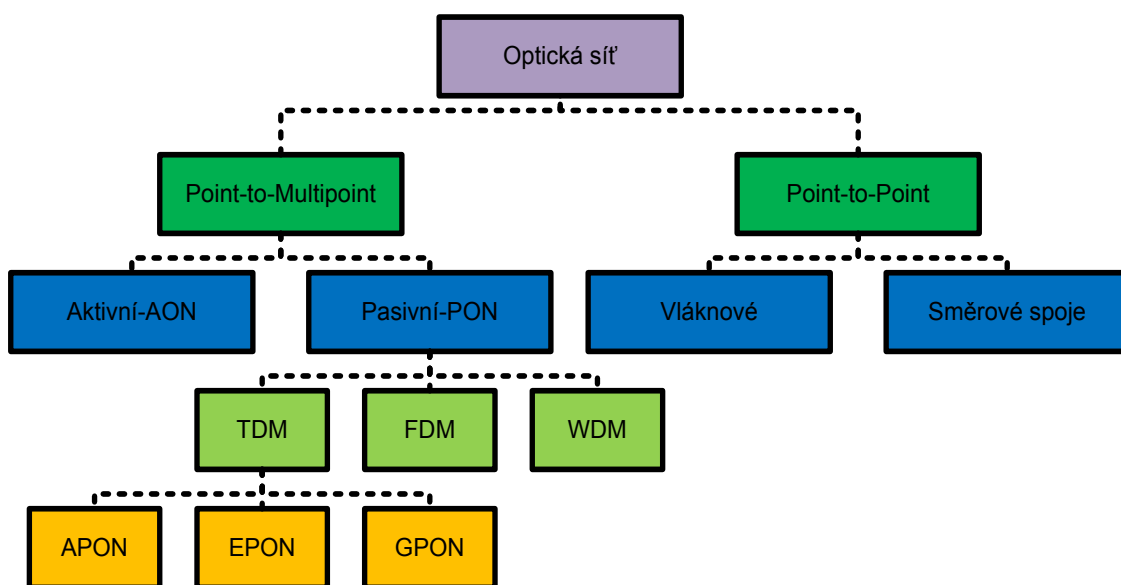
Základní rozdíl je tedy mezi FTTN a FTTP. Kdy FTTP je finančně náročnější, protože jen minimálně využívá stávajícího vedení. U FTTN je tomu naopak. Ovšem z hlediska přenosové kapacity, kde FTTN využívá i několik kilometrů metalického vedení, FTTP umísťuje optické vlákno bezprostředně k účastníkovi a dosahuje tedy vyšších rychlostí.

Závěrem k této problematice. V České republice se v dnešní době budují především sítě typu FTTN. Což je způsobeno hlavně nižší pořizovací cenou. Ale do budoucna se dá předpokládat nárůst sítí typu FTTP.



### 1.3 Topologie sítí

Základní dělení optických sítí dle topologie je na mnohabodové-bod a bod-bod. Dále je můžeme dělit dle použitých prvků, technologií, realizace a multiplexu (viz. obr. 3).



Obr. 3: Rozdělení sítí.

TDM (Time Division Multiplex) - časový multiplex

FDM (Frequency Division Multiplex) - frekvenční multiplex

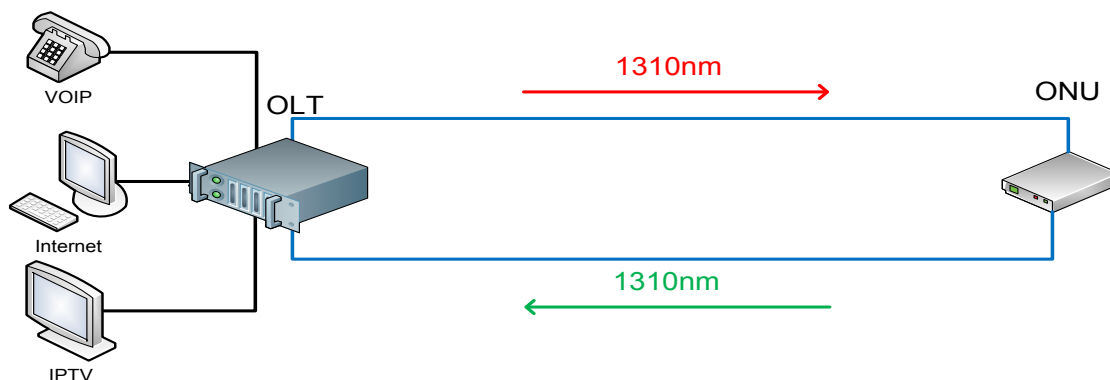
WDM (Wavelength Division Multiplex) - vlnový multiplex

#### 1.3.1 Topologie P-to-P

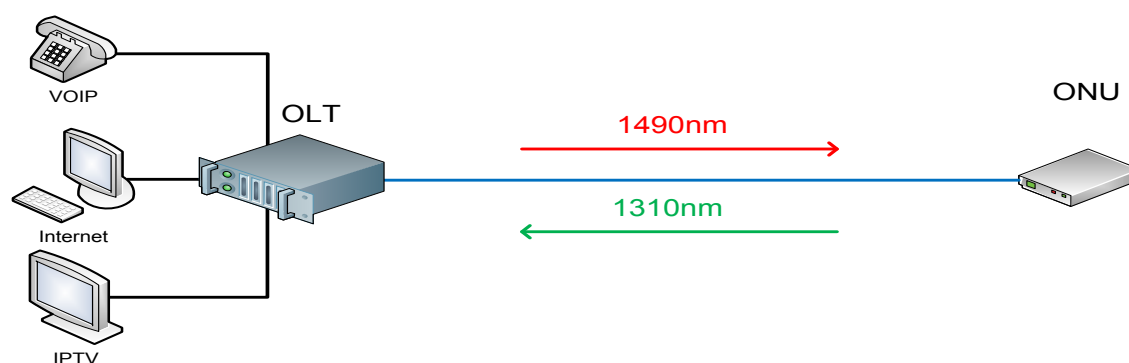
Tato možnost realizace je základní a nejjednodušší jak na realizaci, tak na měření. Jde o logické propojení OLT s každým ONT zvlášť a to buď jedním nebo dvěma vlákny. Je sice nejjednodušším řešením, ale díky propojení každého uživatele zvlášť je velmi nákladná a je zde daleko větší objem kabelu než u jiných.

Jak již bylo řečeno, může k jednotlivým účastníkům být vedeno jedno (viz. obr. 5) nebo dvě vlákna (viz. obr. 4). Při využití dvou vláken, je jedno využito pro směr od účastníka (upstream)

a druhé k účastníkovi (downstream). U jednoho vlákna je nutné využít multiplexu a to tak, že se pro každý směr využívá jiná vlnová délka.



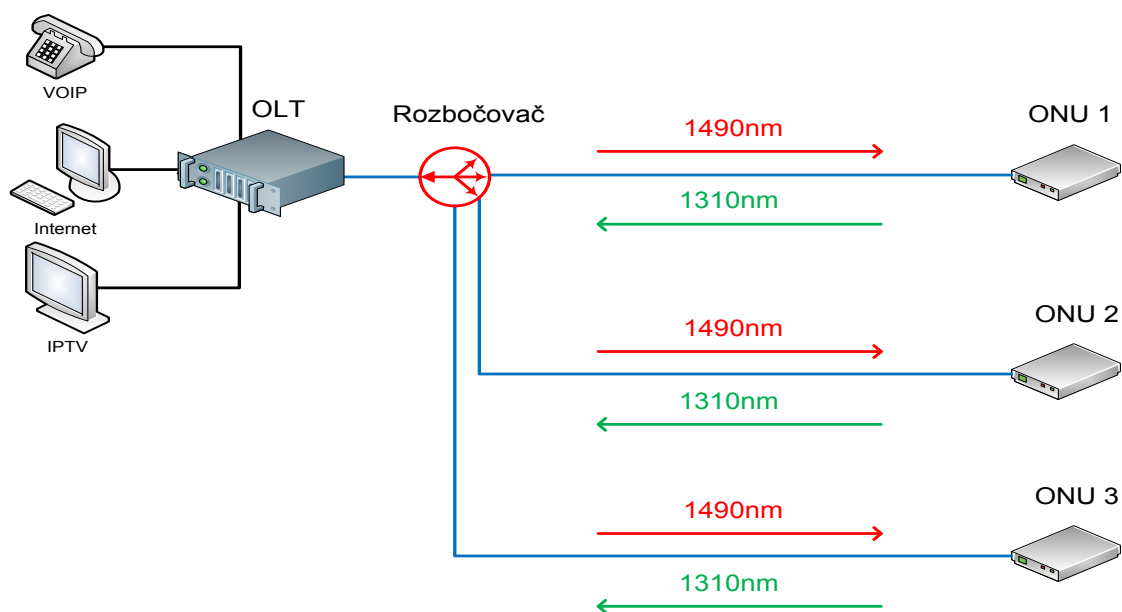
Obr. 4: P-to-P Jednosměrný



Obr. 5: P-to-P obousměrný

### 1.3.2 Topologie P-to-MP.

Jedná se o síť, kde je vlákno z OLT přivedeno v logickém místě na rozbočovací prvek, který dělí příchozí vlákno na různý počet odchozích vláken dle uživatelů (viz. obr. 6). Tato technologie oproti „P-to-P” výrazně šetří počet vláken a je tedy levnější, ovšem na realizaci, měření a správu je složitější. U mnohabodových sítí rozlišujeme dva základní druhy dle použitých prvků v síti. Jsou jimi AON (Active Optical Network) a PON (Passive Optical Network).



Obr. 6: P-to-MP.

### 1.3.3 AON

Tato síť využívá k větvení a k přenosu signálu aktivních prvků, tedy prvků, kterým je potřeba dodávat elektrickou energii. Tyto aktivní rozbočovače signál dělí a to bez vkládání vložného útlumu do trasy. Tím pádem jsme schopni dosáhnout daleko větší vzdálenosti mezi OLT a ONU. Také můžeme využít větších dělicích poměrů a dosáhnout optickým signálem do více míst bez ztráty výkonu. Ovšem tyto sítě jsou nákladnější a je zde nutnost přivést ke každému prvku elektrickou energii.

Takovéto sítě jsou většinou řešeny technologií SDH s topologií využívající kruh. Na niž se účastníci připojují pomocí technologií xDSL.

## 2. Pasivní optická síť

Pasivní optická síť neboli PON, je síť, kde na rozdíl od AON, je ODN tvořena pouze pasivními prvky. Což znamená, že kromě zdroje a detektoru není třeba přivádět elektrickou energii. Pomocí této technologie se sice nedostaneme do takové vzdálenosti, nemůžeme využít vyšších dělicích poměrů, kvůli vloženému útlumu jednotlivých prvků, ale výrazně se nám sníží náklady jak na výstavbu, tak na provoz.

Jednotlivé ONU zachycují jen data určená pro něj, ostatní ignorují. Rámce jsou pro ONU skládány za sebe. Jedná se tedy o časové dělení, které není nutné při užití topologie P-to-P. Rámce jsou většinou ethernetové, ale záleží na použité technologii. Teoreticky lze využít čtyři základní topologie, kruh (Ring), strom (Tree), hvězdu (Star) a sběrnici (Bus). Nejpoužívanější je stromová struktura, která je pro PON sítě typická. Je také možné použití hvězdy a sběrnice. Jak již bylo řešeno, kruhová topologie je užívána v sítích AON, většinou pomocí technologie SDH. Topologie lze různě kombinovat záleží pouze na daném návrhu sítě.

### 2.1 Typy PON sítí

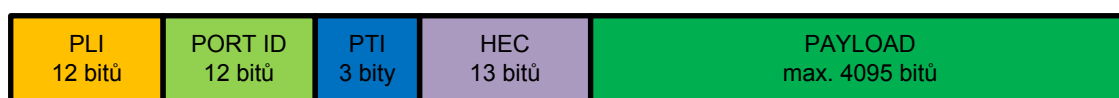
#### 2.1.1 APON

APON (ATM Passive Optical Network) pro standard ITU-T G.983.1 využitý v pasivních optických sítích, které pro přenos využívají ATM (Asynchronous Transfer Mode) rámce. Jedná se o první PON standard, využitelný pro obchodní účely. Tato technologie umožňuje dvě varianty rychlostí. Symetrickou 155 Mbit/s (OC-3) anebo asymetrickou 655 Mbit/s downstream a v opačném směru 155 Mbit/s (OC-12).

Dále standard BPON (Broadband Passive Optical Network) vycházející z doporučení ITU-T G.983.3. Je přímým následníkem APON doplněným o podporu WDM, rozšířené přenosové pásmo a větší spolehlivost. Komunikace probíhá po jednom vlákne na vlnových délkách, 1480-1500 nm pro downstream a 1260-1360nm pro upstream. Lze také využít pásmo 1539-1565 nm. Ve většině případů se využívá vlnových délek 1310 nm (upstream), 1490 nm (downstream) a 1550 nm pro video (Analog/Digital).

### 2.1.2 GPON

GPON (Gigabit Passive Optical Network) vycházející ze standardu ITU-T G.984.1. Je pokračovatelem sítí APON a BPON. Největším rozdílem v technologii GPON je využití protokolu GEM (GPON Encapsulation Method) a systému služebních zpráv a řízení OMCI (ONU Management and Control Interface). GEM vytváří rámce proměnné délky, které díky zapouzdření s ATM buňkami umožňuje kompatibilitu s Ethernet rámcem (viz. obr. 8).



Obr. 7: Struktura GEM rámce.

PLI (Payload Length Indicator) - uchovává v sobě délku Payload pole v bajtech

PORT ID (Port Identifier) - definuje číslo portu, kam je rámec odeslán nebo ze kterého je odeslán

PTI (Payload Type Indicator) - určuje typ pole Payload a zda jde o kompletní rámec, popřípadě první nebo poslední

HEC (Header Error Detection and Correction) - slouží k zabezpečení přenášeného záhlaví (kód s paritou)

Technologie GPON nabízí rychlosti 1,244 Gbit/s nebo 2,488 Gbit/s a to ve směru downstream i upstream. Využívá vlnových délek stejně jako BPON a logický dosah těchto sítí je okolo 20 km. Jako rozbočovacího prvku využívá splittru 1:64, ale v dohledné době lze uvažovat o větších poměrech.

Dalším typem pasivních optických sítí jsou sítě využívající k přenosu ethernetové rámce, takzvané EPON (Ethernet Passive Optical Network). Problematikou těchto sítí se budeme blíže zabývat v následující kapitole.

Tab. 1: Porovnání různých variant PON.

Druh PON	APON	BPON	GPON	EPON	10GEPON
Standard	ITU-T G.983.1	ITU-T G.983.3	ITU-T G.984.1	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av
Rok vydání	1995	2001	2003	2004	2009
Downstream	155,52 nebo 622,08 Mbit/s	155,52 nebo 622,08 Mbit/s	1,244 nebo 2,488 Gbit/s	1,25 Gbit/s	10 Gbit/s
Upstream	155,52 nebo 622,08 Mbit/s	155,52 nebo 622,08 Mbit/s	1,244 nebo 2,488 Gbit/s	1,25 Gbit/s	1 nebo 10 Gbit/s
Použitý protokol	ATM	ATM	ATM, GEM	Ethernet	Ethernet
Max. poměr rozbočovače	1:32	1:32	1:64 (1:128)	1:32, 1:16	1:32
Vlnová délka Downstream	1480-1500 nm	1480-1500 nm	1480-1500 nm	1480-1500 nm	1575-1580 nm
Vlnová délka Upstream	1260-1360 nm	1260-1360 nm	1260-1360 nm	1260-1360 nm	1260-1360 nm

## 2.2 Technologie sdílení přenosového média

Protože v sítích PON je větší či menší část vlákna sdílena všemi uživateli. Proto existují technologie, které nám toto umožňují. Jedná se o tři základní metody: časové oddělení TDM (Time Division Multiplex), frekvenční oddělení FDM (Frequency Division Multiplex) a oddělení vlnové WDM (Wavelength Division Multiplex).

### *2.2.1 TDM*

Jedná se o dělení s hlediska času, tedy jednotlivé buňky jsou logicky uspořádány za sebou. Směrem ze sítě jde rámec, kde jsou za sebou uloženy informace pro jednotlivé ONU. Směrem do sítě má každé ONU vyhrazeno čas pro vložení informace. Tyto informace v rozbočovači vytvoří rámec, který pokračuje sítí jako celek. Rámce bývají ještě odděleny ochranným intervalem.

### *2.2.2 FDM*

Podobně jako v předchozím případě se jedná o oddělení přenosu. Tentokrát jde o oddělení kmitočtové. Přiřazujeme jednu frekvenci směru do sítě a jednu frekvenci směru opačnému. Většinou je oddělení chráněno obdobně ochranným intervalem.

### *2.2.3 WDM*

V neposlední řadě je zde vlnové dělení kanálů. Tato technologie je v dnešní době nejvíce v rozkvětu a zřejmě v ní leží budoucnost optických sítí. Jedná se o rozdělení provozu dle vlnových délek. V tomto případě lze jedno optické vlákno použít stejným způsobem, jako až desítky vláken. Tyto jednotlivé vlnové délky ve vlákne se nazývají kanály (Channel), těchto kanálů můžeme využít jako virtuálních optických vláken. Každé z nich může mít nejen různý směr, ale i různou rychlost či formát. Typů WDM je mnoho a dělí se dle využití vlnových délek a odstupu jednotlivých kanálů. Jsou jimi například:

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing), řídký vlnový multiplex, využívá pásmo 1270-1610 nm s odstupem 20 nm.

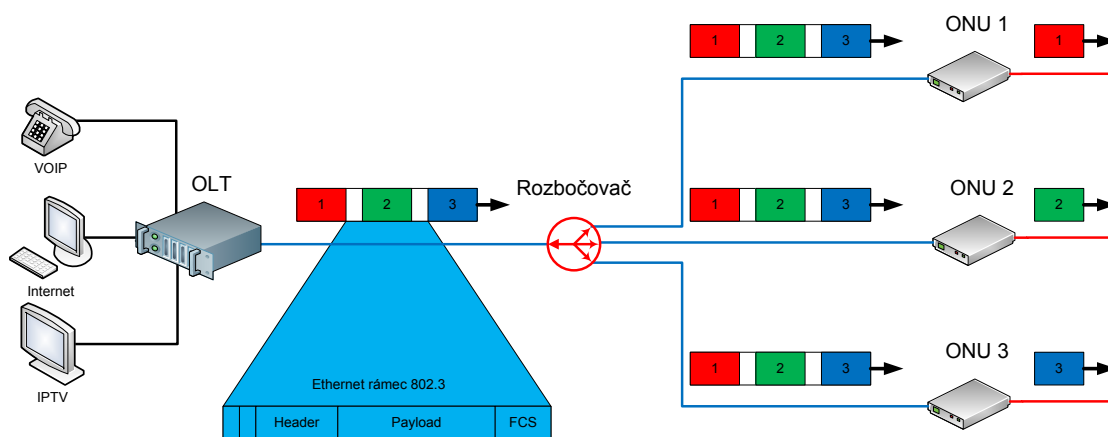
DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), hustý vlnový multiplex, využívá pásmo od 1490-1620 nm s odstupem 0,8 nm nebo 0,4 nm. Díky velice malým odstupům a tím pádem i velkým množstvím kanálů, je náročný na přesnost a tudíž i na prvky v síti.

### 3. Ethernet PON

EPON (Ethernet Passive Optical Network) jedná se o standard IEEE 802.3ah. Tato technologie zavádí Ethernet do pasivních optických přístupových sítí. Tedy jako protokolu pro přenos využívá Ethernetových rámců. Dosahuje symetrické rychlosti 1,25 Gbit/s. Využívá vlnových délek  $1490 \pm 10$  nm pro směr k uživateli a  $1310 \pm 50$  nm pro směr do sítě. Překlenutelná vzdálenost těchto sítí je 20 km a maximální možný rozbočovač je použitelný 1:32. Tento standard byl již mnohokrát rozšířen a jeho rychlost byla navýšena, například Turbo EPON (2,5 Gbit/s), 10GEPON (10 Gbit/s symetricky nebo 10 Gbit/s downstream a 1 Gbit/s upstream asymetricky).

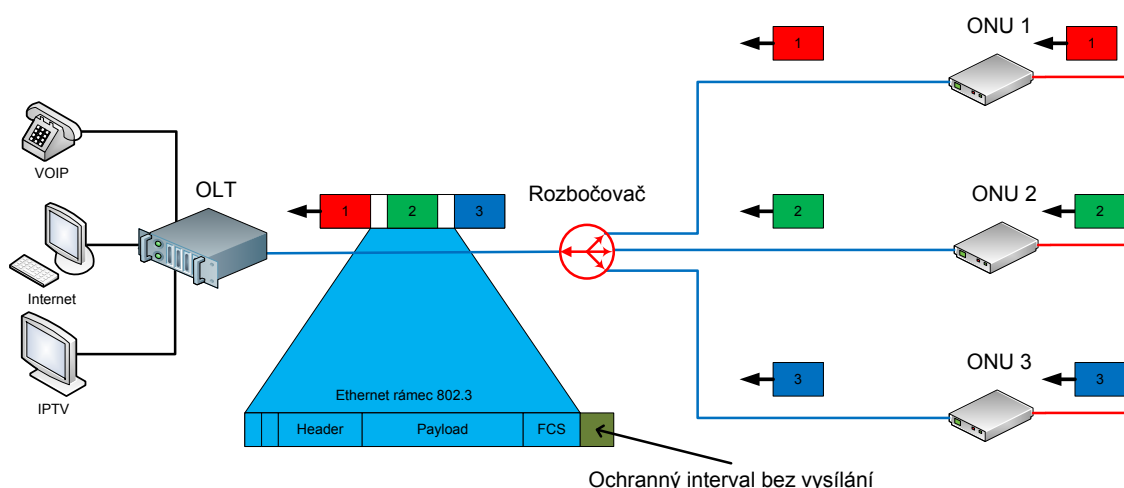
#### 3.1 GEPON

O GEPON technologii je již zmíněno výše, vychází ze standardu IEEE 802.3ah tedy EPON. Přenos zde probíhá pomocí Ethernetových rámců. Dosah takovýchto sítí bývá většinou okolo 20 km od OLT. Oddělení informací pro jednotlivé ONU probíhá pomocí TDM a provoz na jednom vlákne oběma směry pomocí WDM (viz. obr. 9,10).



Obr. 8: Provoz GEPON směr k účastníkovi.





Obr. 9: Provoz GEPON směr do sítě.

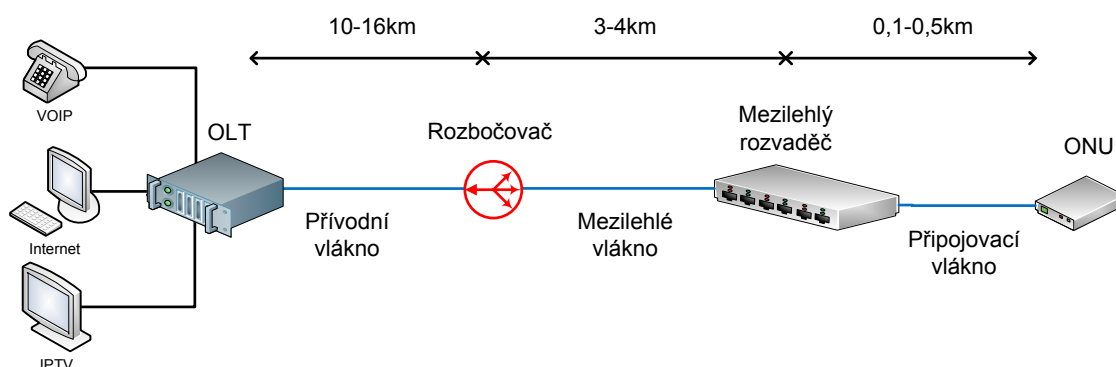
GEPON dosahuje Gigabitových rychlostí a nejběžnější druhem je 10 Gigabitová (10GEPON standard IEEE 802.3av). A to v asymetrické verzi 10 Gbit/s Downstream a 1Gbit/s Upstream a nebo v symetrické verzi o rychlosti 10 Gbit/s. Asymetrická verze byla vytvořena k úspoře nákladů v sítích, kde je převážná většina provozu k účastníkovi (Internet, IPTV). GEPON je vlastně jen rozšíření EPON se zachováváním jejich vlastností a plnou kompatibilitu s ní, ale navýšením rychlosti, použitím jiných vlnových délek a změnou útlumových tříd. Díky různým vlnovým délkám provozu mohou jak EPON, tak 10GEPON existovat vedle sebe na jednom vlákně. Obě tyto technologie využívají dělicího poměru max. 1:32. Na rozdíl od EPON, která je využívána především v Asii, 10GEPON je ještě ve fázi vývoje a standard pro tyto sítě ještě není uzavřen, ovšem z hlediska budoucnosti se s ním dá počítat a to především díky kompatibilitě s WDM-PON.

### 3.2 Návrh GEPON sítě

Návrh sítě s technologií GEPON, stejně jako všech optických sítí, záleží především na požadavcích uživatelů a ekonomické stránce. Před samotným návrhem musíme stanovit, kolik uživatelů se bude připojovat k síti v době budování a kolik perspektivně v budoucnu. Pro topologii sítě je nutné znát vzdálenosti jednotlivých uživatelů a především nejzazšího uživatele v síti. Dále je nutné znát ekonomickou část projektu, servisní předpoklady a jak nově přichodzí uživatele budeme připojovat.

Z hlediska návrhu trasy a topologie je nutné znát takzvaný „Budget Loss“. Tato hodnota nám určuje maximální možný útlum v trase. Je dána optickým výkonem zdroje (např. 2-7 dBm) a citlivostí přijímače (20-30 dBm) a to jak směrem od OLT do ONU, tak směrem opačným. Existuje několik tříd pro různé standardy jako například Class A (5-20 dB), Class B (10-25 dB), Class C (15-30 dB). Právě uvedené se vztahují ke standardům ITU-T, třídy pro IEEE jsou PX10 (odpovídá Class A) a PX20 (odpovídá Class B).

Po určení počtu uživatelů, vzdálenosti nejzazšího místa v síti (tato hodnota se blíží 20 km) a určení Budget Lossu, můžeme přistoupit k návrhu topologie a jednotlivých tras (viz. obr. 11). Jako první stanovíme dělicí poměr rozbočovačů. Máme na výběr z kombinací 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32 (viz. tab. 2). Maximální možný poměr pro síť GEPON je 1:32, který je možné dostat přímo takovýmto rozbočovačem anebo jak tomu bývá ve většině případů, kombinací (1:4 x 1:8 nebo 1:2 x 1:16). Dalšími prvky v trase jsou sváry s typickou hodnotou 0,01-0,02 dB a konektory s 0,2-0,5 dB.



Obr. 10: Rozložení délek PON sítě.

Tab. 2: Typické útlumové hodnoty splittrů.

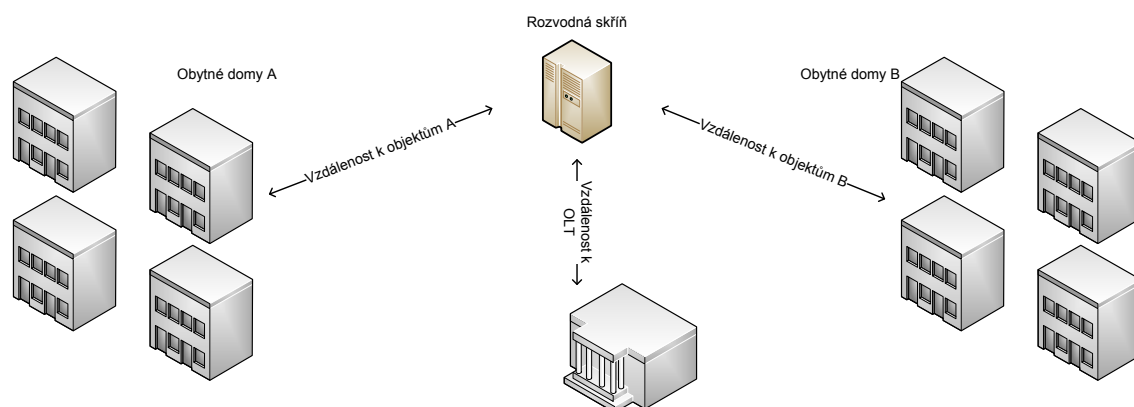
Dělicí poměr	Maximální útlum [dB]
1:2	3,5
1:3	5,8
1:4	6,9
1:7	9,4
1:8	9,8
1:16	13,5
1:32	16,5
1:64	20
1:128	23,5

V neposlední řadě se musíme zabývat útlumem samotné trasy, tedy optického vlákna. Hodnoty útlumu těchto tras se mohou lišit dle použitého vlákna nebo vlnové délky. Pro příklad jsou uvedeny hodnoty vlákna G.652D v nejpoužívanějších vlnových délkách: 0,34 dB pro 1310 nm, 0,24 dB pro 1490 nm a 0,21 dB pro 1550 nm.

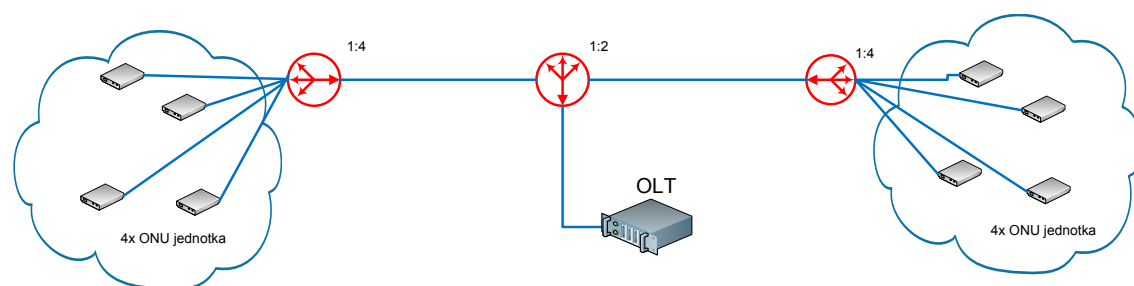
### 3.3 Modelové situace

Po prostudování těchto hodnot můžeme přistoupit k detailnímu návrhu a k tvorbě celé topologie sítě. Pro příklad je uvedeno několik variant těchto sítí s výpočtem útlumu a délky vlákna.

### 3.2.1 FTTB se dvěma malými sídlišti



Obr. 11: FTTB pro zástavbu panelovými domy.



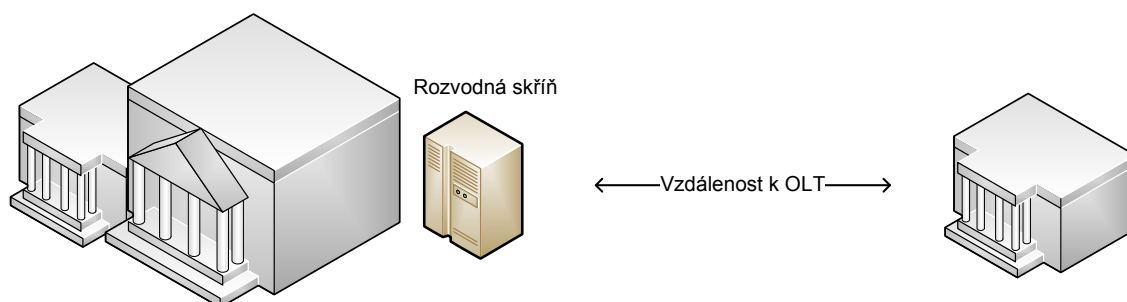
Obr. 12: Možná realizace FTTB.

Tab. 3: FTTB útlumová kalkulace.

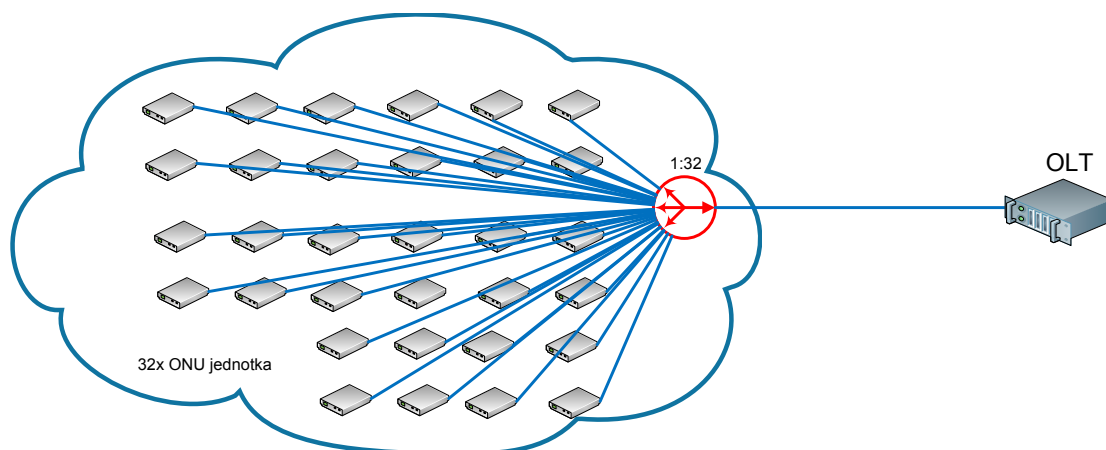
Název	Počet	Útlum [dB]	Celkový útlum [dB]
konektor	6*	0,3	1,8
svár	12*	0,01	0,12
splitter 1:4	1	7,4	7,4
splitter 1:2	1	3,7	3,7
*počet konektorů a svárů je zkrácen, v reálu se může lišit			13,02

V první situaci vidíme možné rozložení domů, kde se nám nabízí řešení FTTB (viz. obr. 12,13). Při použití vlákna G.652D s útlumem 0,34 dB/km a při předpokládaném Budgetu PX20 (25 dB), dosáhneme od OLT k nejzazšímu ONU vzdáleném až 35 km (viz. tab. 3). Zde je vzdálenost poměrně velká, což je způsobeno především nízkým dělicím poměrem, kdy výkon OLT pokryje pouze 8 ONU.

### 3.2.2 FTTO velké firmy/komplexu



Obr. 13: FTTO pro větší firmu/komplex.



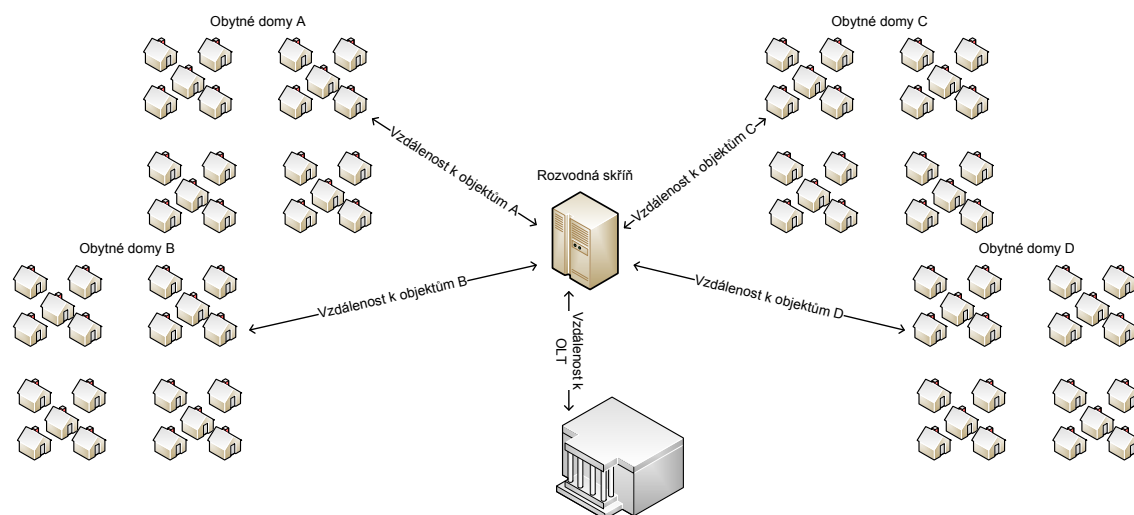
Obr. 14: Možná realizace FTTO.

Tab. 3: FTTO útlumová kalkulace.

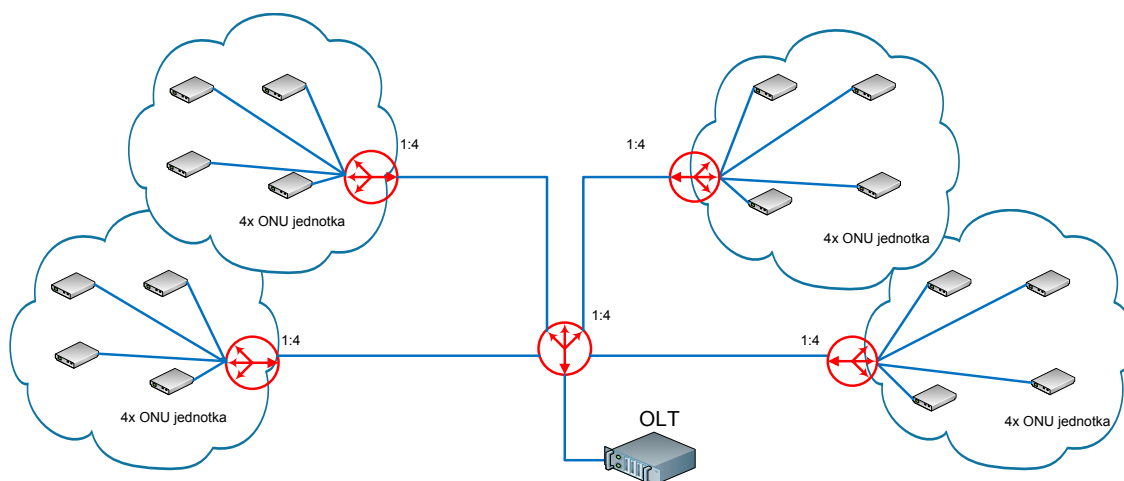
Název	Počet	Útlum [dB]	Celkový útlum [dB]
konektor	4*	0,3	1,2
svár	8*	0,01	0,08
splitter 1:32	1	17,3	17,3
*počet konektorů a svárů je zkrácen, v realu se může lišit			18,58

Druhý model pro využití v komplexu administrativních budov, kde je nutné přivést optické vlákno, až do kanceláře (viz. obr. 14,15). Při použití vlákna G.652D s útlumem 0,34 dB/km a při předpokládaném Budgetu PX20 (25 dB), dosáhneme od OLT k nejzazšímu ONU vzdáleném až 18 km (viz. tab. 3). Toto je nejbližší příklad reálu, dělicí poměr je 1:32, což je v praxi dosažitelné. Vzdálenost blízká se 20 km je limitní pro tuto technologii. S takového hrubého návrhu se nedají konečné vlastnosti sítě vyčíst a slouží nám jen pro orientaci.

### 3.2.3 FTTC skupina rodinných domů



Obr. 15: FTTC skupina rodinných domů/menší vesnice.



Obr. 16: Možná realizace FTTC.

Tab. 4: FTTC útlumová kalkulace.

Název	Počet	Útlum [dB]	Celkový útlum [dB]
konektor	6*	0,3	1,8
svár	12*	0,01	0,12
splitter 1:4	2	7,4	14,8
*počet konektorů a svárů je zkrácen, v reálu se může lišit			15,016

Poslední situací je řadová zástavba, ve které ke každé skupině domů vede optické vlákno (viz. obr. 16,17). Při použití vlákna G.652D s útlumem 0,34 dB/km a při předpokládaném Budgetu PX20 (25 dB), dosáhneme od OLT k nejzazšímu ONU vzdálenému až 29 km (tabulka 5). Modelová situace FTTC, tedy zakončení optického vlákna u chodníku. Zde je část sítě (až 300 m) tvořena metalickým vedením. Větší vzdálenost je dána menším dělicím poměrem na 16 ONU zakončení.

#### 4. Specifikace a konfigurace prvků v měření

Před zahájením měření je nutné seznámit se a nakonfigurovat veškeré prvky v síti. Pasivními prvky v síti jsou rozbočovače, optické vlákno, konektory (sváry) a útlumové články. Měřicí základnou je tester sítě (EXFO AXS-200/850), měřič výkonu (EXFO PPM-350C), Loopback jednotka (AEN-1000-GE), reflektometr (OTDR EXFO FTB-400) a sada pro měření přímou metodou (NOYES OPM4 a OLS2 dual). Samozřejmě je nutná i konfigurace zdroje signálu tedy OLT (iMAP9100).

##### 4.1 Pasivní prvky v síti

Pasivní části sítě kromě svých primárních vlastností, vedení signálu, spojení, rozbočení, nám udávají útlum celé trasy.

Optické vlákno, ať ve formě propojovacích kabelů nebo trasy namotané na špulce, bylo zakončeno konektorem SC konektorem. Propojení kabelů pomocí SC-SC spojek nebo svařením na optické svářečce (Fujikura FSM45, Sumimoto Type-39). Použité vlákno G.652.D dosahuje útlumu 0,34 dB/km při 1310 nm. Velikost využitých tras je 1 km, 750 m, 500 m a 300 m. Část trasy je umístěna v laboratoři vlastním vedením k pracovním stolům. Změřený útlum těchto tras je uveden v tabulce:

Tab. 5: Útlum použitých tras.

Předpokládaná délka [m]	Skutečná délka [m]	Útlum [dB]
1000	899	0,406
750	781	0,293
500	516	0,726
300	318	0,168

Rozbočovače jsou prvky, které se značně podílejí na útlumu trasy. Jde o rovnoměrné, v některých případech nerovnoměrné rozdělení vstupu na N-výstupů. Z hlediska pasivních sítí



jde o klíčový prvek, který limituje počet zákazníků a topologii sítě. Použité rozbočovače měly dělicí poměr 1:32, 1:7, 1:4, 1:3 a dvakrát 1:2. Naměřený útlum (průměrný útlum všech výstupů) v porovnání s typickými hodnotami:

Tab. 6: Útlum použitých rozbočovačů.

Dělicí poměr	Skutečný útlum [dB]	Typický útlum [dB]
1:32	16,24	16,5
1:7	8,91	9,4
1:4	7,2	6,9
1:3	5,77	5,8
1:2	7,18	3,5
1:2	4,09	3,5

Útlumový článek neboli Atenuátor je pasivní zařízení, které svým jmenovitým útlumem snižuje výkon signálu ze svého vstupu na výstup. Použité útlumy mají hodnotu 10 dB, 5 dB, 3 dB a 2 dB.

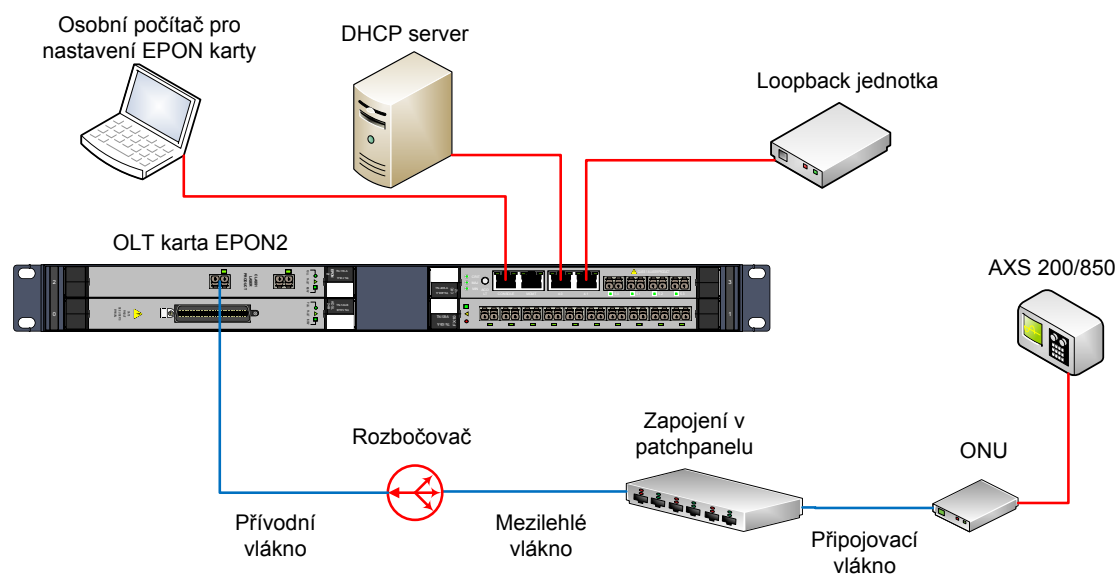
#### 4.2 Měřicí přístroje

Jak již bylo řečeno měření probíhalo, na několika přístrojích, u některých se zapojení lišilo a byla nutná konfigurace.

Základním měřením, ještě před započítáním vysílání informačních dat do sítě, bylo měření útlumu celé trasy. Toto probíhalo pomocí přímé metody, kdy na začátek trasy byl připojen zdroj záření NOYES OLS2 dual a na konec trasy detektor NOYES OPM4. Přímá metoda (transmisní) je metoda využívající zdroj a detektor. Je nutné znát začátek a konec vedení. Rozlišujeme metodu dvou délek a metodu vložných ztrát. První metoda je přesná, ale destruktivní (měřené vlákno již nelze použít). Druhá metoda je využita v této práci a jedná se zřejmě o nejpoužívanější metodu pro měření útlumu.

Po změření celkového útlumu bylo možno do trasy připojit signál z OLT. Namísto jednotky ONU byl připojen měřicí přístroj EXFO PPM-350C. Tento přístroj nám změřil na 1490 nm výkon po průchodu celou trasou v decibelech měrných (dBm).

Závěrečné měření probíhalo na přístroji EXFO AXS-200/850, který vyhodnocoval test RFC 2544. Tento test měří na celé trase propustnost Mbit za sekundu, Back-to-Back (jde o vyhodnocení největší možné rychlosti bez ztrát) v Mbit za sekundu, ztrátovost v procentech a zpoždění v milisekundách. Tento přístroj byl zapojen pomocí metalického vedení na výstup z ONU jednotky. Pro měření RFC 2544 je nutné, aby vyslané informace byly opět doručeny zpět do měřicího přístroje a na základě porovnání vyhodnocuje výsledky. V tomto případě je možné připojit na jednu stranu sítě jeden a na druhou stranu druhý přístroj. K dispozici nám byl přístroj pouze jeden, proto jsme pomocí Loopback jednotky, která u příchozích rámců zamění cílovou a zdrojovou adresu (IP i MAC), umístěné za OLT vraceli příchozí pakety zpět k odesílateli (viz. obr. 18).



Obr. 17: Zapojení měřicího systému.

Na obrázku vidíme šasi iMAP9100, které je doplněno o kartu CFC12 (TN-408), která slouží pro připojení externího signálu po metalickém vedení a pro konfiguraci zbývajících karet. Zde máme nevyužité karty ADSL 24B (TN-124) a FX20 BX (TN-139). Poslední připojenou kartou je karta EPON2 (TN-118), ta je pro nás nejdůležitější a budeme se jí zabývat dále.

Posledním měřicím přístrojem je OTDR EXFO FTB-400 s modulem FTB-7200D. Tento reflektometr byl použit pro měření tras, které byly již připraveny v laboratoři. Na rozdíl od přímé metody nám tento přístroj neudává pouze celkový útlum, ale vykreslí nám celou trasu s veškerými útlumovými událostmi. Měří na základě zpětného rozptylu, tudíž není potřeba vědět, kde je konec trasy ani na něj cokoli připojovat. Reflektometr nebo reflektometrie je založena na Rayleigho rozptylu, tedy návratu odraženého výkonu zpět. Díky tomu se stává zároveň zdrojem i detektorem. S útlumem nám také uvádí, ve kterém místě se událost nachází, a tudíž jsme schopni určit délku trasy.

### 4.3 Konfigurace měřicích přístrojů

U většiny použitých měřicích přístrojů se nejedná o konfiguraci, ale o jednoduché zapnutí započítí měření popřípadě změnu měřených veličin. Složitější nastavení je u měřicího systému EXFO AXS-200/850 s podporou Loopback jednotky.

Konfigurace EXFO ASX-200/850:

- po zapnutí přístroje v položce Setup ► Interface. Záložka Network nastavení pevné adresy 192.168.20.99 maska 255.255.255.0. Default Gateway nenastavujeme,
- položka Port nastavení: Electrical, Auto-negotiation Enabled, Speed 100Mbps, Duplex Full, Flow control None,
- položka RFC 2544 ► Configuration. V záložce Stream nastavení MAC adresy a ip adresy Loopback jednotky (00:15:AD:00:A0:07 192.168.20.100) TTL 255, TOS 00, Source UDP 49184, Destination UDP 7,
- v záložce Global ponecháme velikost rámců dle doporučení pro Ethernet (64, 128, 256, 512, 1024, 1280, 1518 byte). Určení testů, které chceme absolvovat,
- můžeme začít s měřením.

Konfigurace Loopback jednotky AEN-1000-GE:

- připojení UTP kabelu z konfiguračního počítače k portu Management. Nastavení adresy na síťové kartě počítače, která bude k jednotce přistupovat na adresu: 192.168.1.2,
- přistoupení k webovému rozhraní, které je umístěno na adrese <https://192.168.1.254/>,
- vyplnění jména a hesla (defaultně admin, admin). Dále v záložce Port ► Configuration otevření příslušného port a pojmenování (Loopback), dále nastavení přenosové rychlosti 100Mbps, auto-negotiation a full-duplex,

- v záložce System ► Configuration ► Interface vytvoření účtu, přiřazení ip adresy 192.168.20.100 maska 255.255.255.0 a přidání na port dle jména,
- vytvoření instance s názvem Loopback v záložce OAM. OAM ► Loopback editujeme vytvořenou instanci. Zapnutí funkce smyčkování a nastavení, co vše se bude vracet (otočení zdrojové, cílové adresy, protokolu),
- na určeném portu funguje funkce Loopback.

#### 4.4 Konfigurace a specifikace OLT

OLT jednotka, tedy karta EPON2 (TN-118), umístěná v racku, umožňuje výstavbu dvou sítí s maximálním možným rozbočovacím prvkem 1:32 a s maximální symetrickou rychlostí 1,25 Gbit/s. Pracovní vlnové délky jsou stejné dle technologie EPON, tedy 1490 nm vysílací a 1310 nm přijímací.

Konfigurace karty EPON2 TN-118:

- připojení UTP kabelu z konfiguračního počítače k portu Console. Spuštění programu HyperTerminal nastavení rychlosti 9600 bit/s, datových bitů 8, parita žádná, počet stop-bitů 1 a řízení toku žádné,
- vyplnění jména a heslo (defaultně officer, officer). Příkaz *show system* ukáže nastavení celého systému iMAP a připojení jednotlivých karet,
- *Show card 2* (číslo udává slot, ve kterém je karta zasunuta) vypíše informace o EPON2 kartě důležitá položka je State, která udává, jestli je karta v provozu,
- *Show interface 2.0* (popř. 2.1 záleží na příslušném portu) vypíše informace o jednom ze dvou portů EPON2 karty, opět je možná kontrola stavu portu a zároveň zde jsou informace o registrovaných a připojených ONU,
- je nutná registrace ONU jednotky pro umožnění přístupu k OLT. Příkazem *create onu* <libovolné jméno> *onuid*=<libovolné číslo 0-31> *interface*=<port, ke kterému bude ONU přistupovat> *mac*=<MAC adresa ONU> *type* <volitelná položka>,
- připojení ONU jednotky můžeme ověřit funkcí příkazem *show interface* <libovolné jméno zadané při registraci>. Při správné registraci a připojení jednotky by položka State měla být *UP-UP*.

#### 4.4.1 SFP Modul

Nedílnou součástí OLT je SFP modul. Jde o zásuvný modul do EPON karty, který nám zprostředkovává vysílací a přijímací část OLT.

SFP (Small Form Factor Pluggable) moduly jsou vyráběny v různých typech s různými vlastnostmi, například pro různé rychlosti od 100 Mb/s až po Gigabitové rychlosti. SFP moduly jsou různě označeny, např. SX, BX, LX, XD, ZX, atd. Dle těchto označení lze určit využívané vlnové délky (850 nm, 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm) i dosah sítě se liší (od stovek metrů po desítky kilometrů). Zde hraje velkou roli výkon, který se může značně lišit a také citlivost. Rozdíly jsou také v použitých vláknech a technologiích, tedy určení pro jednovidová či mnohovidová vlákna.

Moduly je možné do sítě vkládat za „horka“, tedy při zapnutém přístroji a různě měnit. K dispozici jsou jak pro optické sítě, tak pro metalické, což při budované metalické síti nahrává možným inovacím v budoucnu. Modul obsahuje 256 Bytovou EEPROM paměť, která je přístupná přes rozhraní I<sup>2</sup>C. Na této paměti jsou uloženy veškeré informace o modulu, např. výrobce, přenosové schopnosti, rozhraní, použité konektory, dosažitelná vzdálenost nebo typ.

Typ použitého SFP modulu je FTM-9712S-SL20 od firmy Fiberxon (viz. obr. 19), který je určen pro gigabitové sítě s dosahem 20 km. Vyrábí se ve variantách E, G, GE, které určují provozní teplotu a RoHS (Restriction of Hazardous Substances) směrnice. Ty nám určují omezení o používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních a jsou vydány Evropskou unií.



Obr. 18: SFP modul FTM-9712S-SL20.

Základní vlastnosti FTM-9712S-SL20 jsou uvedeny v tab. 7. Typické popřípadě minimální hodnoty byly dále využity v simulaci měření.

Tab. 7: Vlastnosti FTM-9712S-SL20.

	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Vlnová délka vysílače [nm]	1480	1550
Výkon vysílače [dBm]	2	7
Vlnová délka vysílače [nm]	1260	1360
Citlivost vysílače [dBm]	-	-30
Saturace vysílače [dBm]	-6	-
Bit Error Rate	$10^{-12}$	-
Provozní teplota [°C]	0	70

#### 4.5 Specifikace ONU jednotky

ONU jednotka, tedy přijímací část na straně uživatele, je tvořena detektorem a zdrojem. Dle technologie GePON vysílá na 1310 nm a přijímá signál od OLT na 1490 nm.

Jednotkou využívanou v této diplomové práci je AT-ON1000 (viz. obr. 20). Vysílací výkon v decibelech měrných se pohybuje od -1 do 4. Citlivost na místě detektoru je -26,5 dBm.

V měření zastává úlohu převodníku. Tedy konverzi optického signálu na elektrický a naopak.



Obr. 19: ONU AT-ON1000.

## 5. Programové prostředí Optiwave

Simulace měření probíhala pomocí softwaru OptiSystem 9.0. Optisystem patří do skupiny programů spadající pod firmu Optiwave Systems Inc. Tato skupina obsahuje další programy, jako jsou OptiBMP (komplexní CAD prostředí pro návrh složitých optických členů), OptiFDTD (CAD projektování, simulace, návrh, analýza a testování moderních pasivní non-lineární fotonických prvků), OptiFiber (specializovaných program pro optická vlákna na výpočet rozptylu, ztrát, dvojlomů, a PMD), OptiPerformer (pracovní freeware prostředí pro spuštění již hotových simulací z OptiSystem), OptiSPICE (pro analýzu opto-elektronických integrovaných obvodů), OptiGrating (umožňuje modulaci a analýzu mřížek například pro vlákna, filtry, senzory, atd.).

### 5.1 OptiSystem 9.0

Optisystem je komplexní software pro tvorbu, plánování, simulování a testování optických přístupových sítí. Nabízí ekonomické kalkulace, přes 300 prvků moderní optoelektroniky, měření a vizualizace. Je také úzce propojen s ostatními programy od společnosti Optiwave, například v OptiBMP je možné navrhnut složitější zařízení a exportovat ho jako prvek do OptiSystem pro další měření.

OptiSystem dovoluje navrhnout jakoukoliv síť na jakékoliv technologii (WDM, BPON, GPON, EPON). Je možné vytvořit jednosměrné i obousměrné trasy.

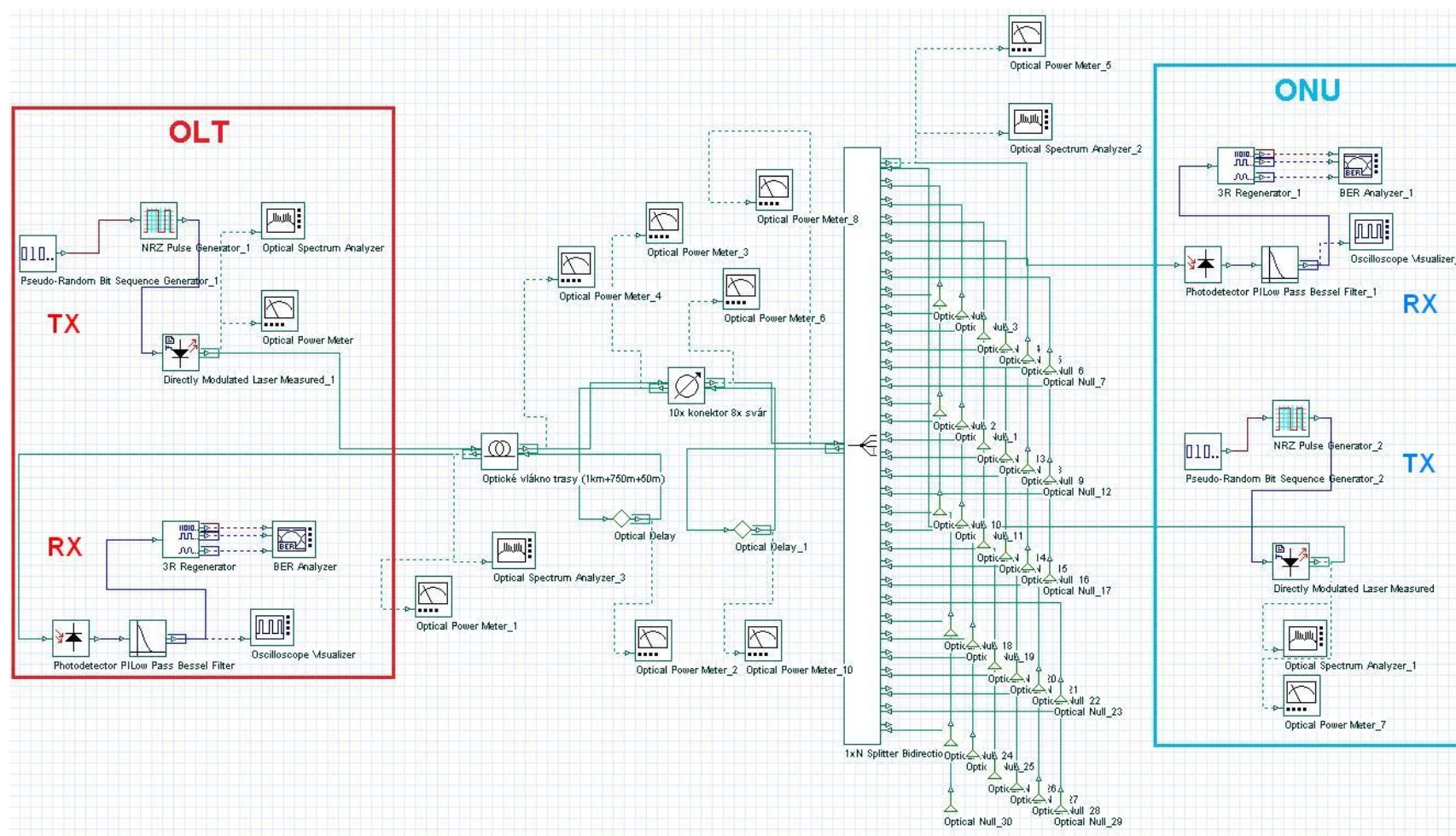
Návrh EPON sítě probíhal nejprve jako jednosměrné po jednom vlákne, poté byl přestaven na systém o dvou vlnových délkách a obou směrech (viz. obr. 21). Konfigurace a návrh některých prvků je pro příklad uveden zde:

Konfigurace EPON v programovém prostředí OptiSystem

- zapnutím softwaru a otevřením nového projektu. Vyhledávání prvků probíhá v okně *Component Library* pomocí pravého tlačítka a funkce *Component Search*,
- nastavení obousměrného optického vlákna. Délka dle topologie, útlum 0,28dB (průměr hodnot pro 1310 nm (0,34 dB/km) a 1490 nm (0,22 dB/km)), disperze 3,5 ps/nm/km, PMD 0,2 ps/√km, efektivní oblast 70 μm<sup>2</sup>,

- vysílačem je laser s přímou modulací (výkon OLT 2 dBm, ONU -1 dBm) a přijímačem fotodetektor s dolní propustí,
- útlumovým článkem je oboustranný atenuátor s útlumem odrazu 65 dB a vlastním útlumem dle zapojení,
- posledním prvkem v síti je obousměrný rozbočovač, který má nastaven typický vložný útlum a útlum odrazu také 65 dB,
- díky nejednosměrnosti soustavy je nutné přidat do jednoho směru optické zpoždění, které nám umožní měřit v obou směrech. Ovšem je nejprve nutné zvýšit počet iterací (opakování) v globálním nastavení.



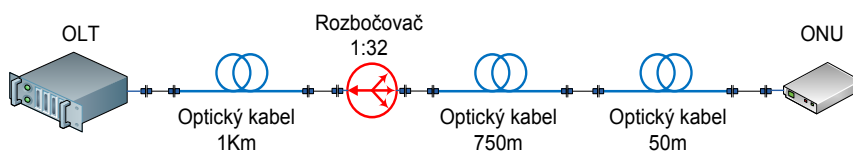


Obr. 20: Ukázka zapojení v programu OptiSystem 9.0.

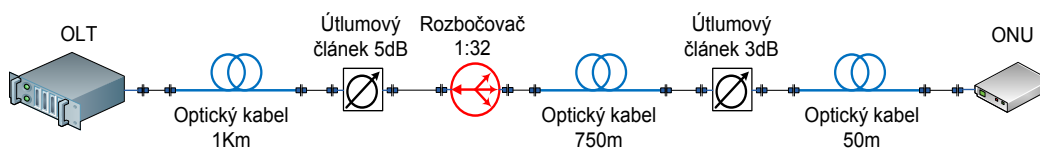
## 6. Naměřené a simulované hodnoty včetně rozboru

Měření proběhlo dle vybavenosti laboratoře a pro simulace byla vytvořena totožná zapojení, aby mohlo dojít k porovnání realizované sítě se sítí programově vytvořenou. Sítí bylo zapojeno dohromady 14 a byly v nich použity veškeré dělicí poměry rozbočovačů, které byly k dispozici (viz. obr. 22-35). Každá ze sítí byla měřena nejprve s minimálním a poté se značným zatížením. U jedné sítě bylo otestováno maximální možné zatížení pro tyto OLT a ONU. Test RFC 2544 byl proveden u každé sítě a veškeré výsledky včetně většiny obrázků ze simulací jsou uvedeny v příloze.

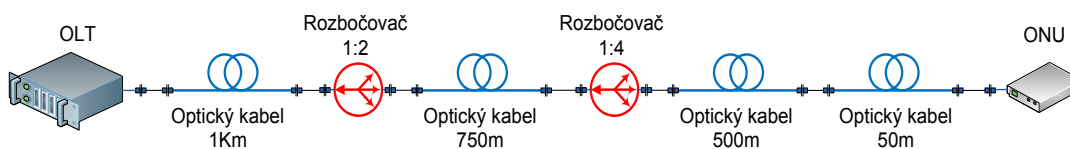
### 6.1 Schémata měřených sítí



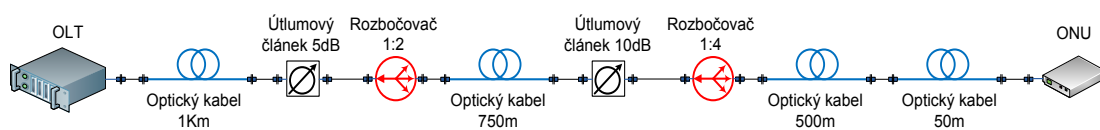
Obr. 21: Měření č. 1.



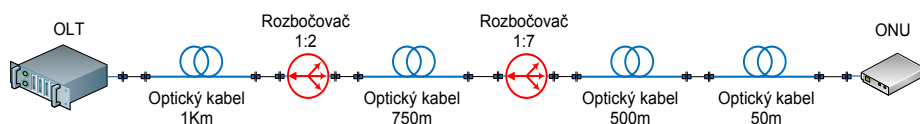
Obr. 22: Měření č. 2.



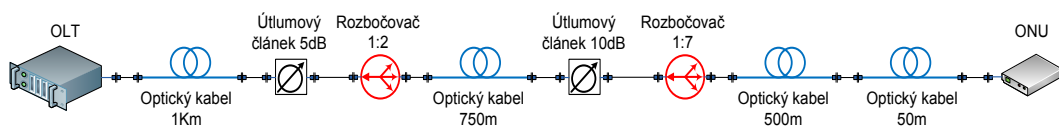
Obr. 23: Měření č. 3.



Obr. 24: Měření č. 4.



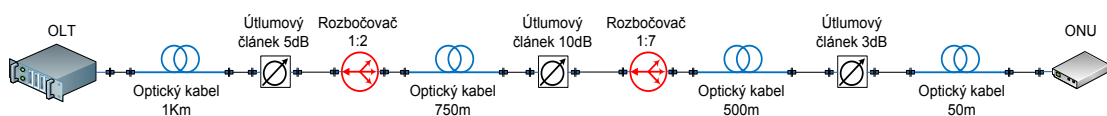
Obr. 25: Měření č. 5.



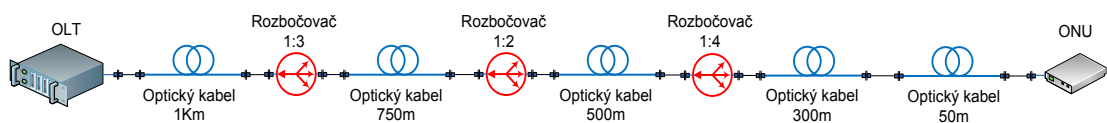
Obr. 26: Měření č. 6.



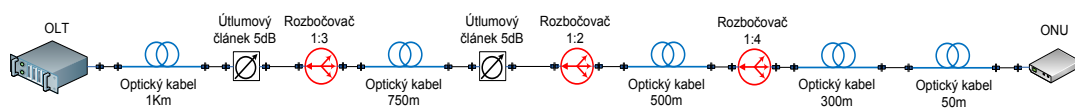
Obr. 27: Měření č. 7.



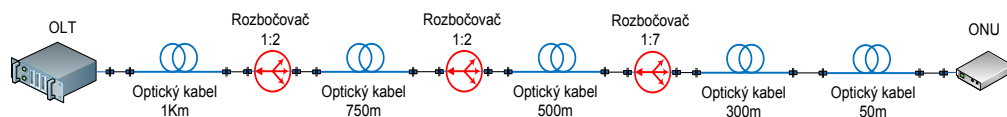
Obr. 28: Měření č. 8.



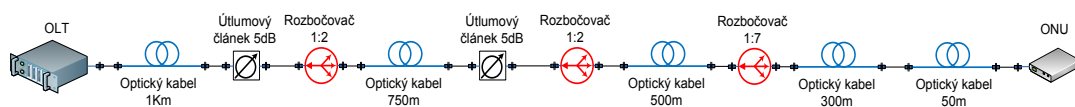
Obr. 29: Měření č. 9.



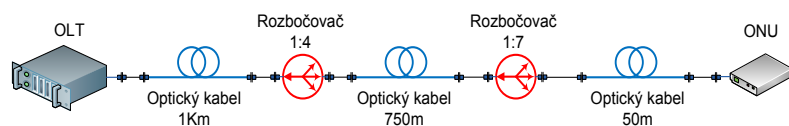
Obr. 30: Měření č. 10.



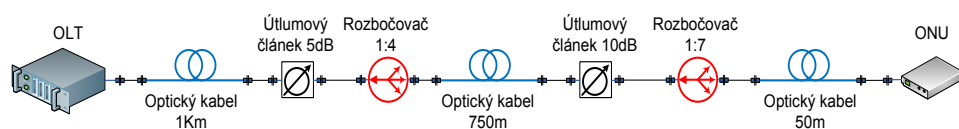
Obr. 31: Měření č. 11.



Obr. 32: Měření č. 12.



Obr. 33: Měření č. 13.



Obr. 34: Měření č. 14.

Ke každé síti kromě vlákna, které je ve formě špulky umístěno v racku, je přidáno 50ti metrové vlákno, které znázorňuje vedení kabelu k jednotlivým stolům v laboratoři plus propojovací vlákna mezi prvky. Dále vidíme na každém obrázku konektory, které jsou důležité pro kalkulace v simulačním prostředí, zároveň zde nejsou uvedeny sváry kvůli názornosti

a jednoduchosti schémat. U měření číslo 6,7 a 8 je postupně zjišťováno maximální možné zatížení sítě. V realizované síti je poslední funkční zapojení číslo 7, v případě měření č. 8 už nedošlo k přenosu informace z OLT k ONU.

## 6.2 Naměřené výsledky

Tab. 8: Naměřené výsledky.

Číslo měření	Simulace měření					Reálné měření		
	Útlum trasy [dB]	Výkon u ONU [dBm]	Výkon u OLT [dBm]	BER u ONU	BER u OLT	Útlum 1310nm [dB]	Útlum 1550nm [dB]	Výkon u ONU [dBm]
1	20,09	-18,08	-21,08	0	0	19,53	20,27	-16,1
2	26,69	-24,68	-27,68	$3,84 \cdot 10^{-112}$	$1,95 \cdot 10^{-34}$	26,62	26,89	-23,1
3	15,39	-13,38	-16,39	0	0	12,79	15,68	-10,8
4	31,21	-29,2	-32,21	$6,47 \cdot 10^{-17}$	$4 \cdot 10^{-6}$	28,73	29,36	-25,2
5	17,88	-15,87	-18,87	0	0	14,86	17,25	-12,1
6	33,47	-31,46	-34,47	$3,41 \cdot 10^{-7}$	$2,87 \cdot 10^{-3}$	30	32,33	-27,6
7	35,77	-33,76	-36,76	$1,64 \cdot 10^{-3}$	1	31,78	34,17	-29,4
8	36,77	-34,76	-37,76	$9,6 \cdot 10^{-3}$	1	33,62	35,92	-31,0
9	22,52	-20,51	-23,52	0	$1,49 \cdot 10^{-176}$	17,19	20,78	-15,1
10	33,12	-31,11	-34,12	$8,72 \cdot 10^{-8}$	$7,02 \cdot 10^{-3}$	27,49	31,11	-25,4

11	22,74	-20,7	-23,71	0	$2 e^{-162}$	17,68	20,07	-14,3
12	33,31	-31,3	-34,3	$2,81 e^{-7}$	$9,41 e^{-3}$	27,94	30,74	-25,3
13	20,52	-18,52	-21,52	0	0	16,37	16,76	-12,8
14	31,12	-29,11	-32,12	$1,55 e^{-17}$	$2,73 e^{-6}$	27,35	28,13	-23,7

V tab. 8 vidíme naměřené hodnoty ze simulace a z reálného prostředí. V levém sloupci jsou čísla měření, která nám udávají měřenou síť. Hodnoty v simulaci jsou vypočítaný útlum trasy v dB, naměřený výkon u OLT a ONU jednotky v dBm a hodnota BER z oku diagramu u OLT a ONU. Z reálného měření máme hodnotu útlumu trasy při 1310 nm a 1550 nm v dB a výkonu u ONU jednotky v dBm. Výkon na straně OLT nelze „power metrem“ změřit, jelikož ONU jednotka bez příchozího signálu nevysílá.

V tabulce jsou různou barvou odlišena pole. Oranžová políčka značí, kdy by systém již neměl fungovat dle teoretických předpokladů, ale fungoval. Červená políčka v simulaci značí předpokládanou nefunkčnost systému. V měření značí reálnou nefunkčnost.

Při rozhodnutí, zda by síť měla či neměla fungovat, vycházíme z citlivosti ONU -26,5 dBm a citlivosti OLT -30 dB, minimální výkon OLT je 2 dBm (reálně ke 4 dBm), ONU -1 dBm. Simulace vykazuje oproti reálu značné rozdíly (až 6 dB) to je dáno především tím, že je počítáno s maximálními útlumy veškerých prvků v síti a nižším výkonem vysílače.

### 6.3 Měření v OptiSystem

V simulačním programu OptiSystem máme možnost ke každému místu v síti připojit měřič výkonu, takže přesně víme o podílu všech prvků na útlum v trase (viz. obr. 36, tab. 9,10).



Obr. 35: Měřič výkonu (měření č.1 strana ONU).

Tab. 9: Průběh útlumu trasou (směr k ONU) pro měření 1.

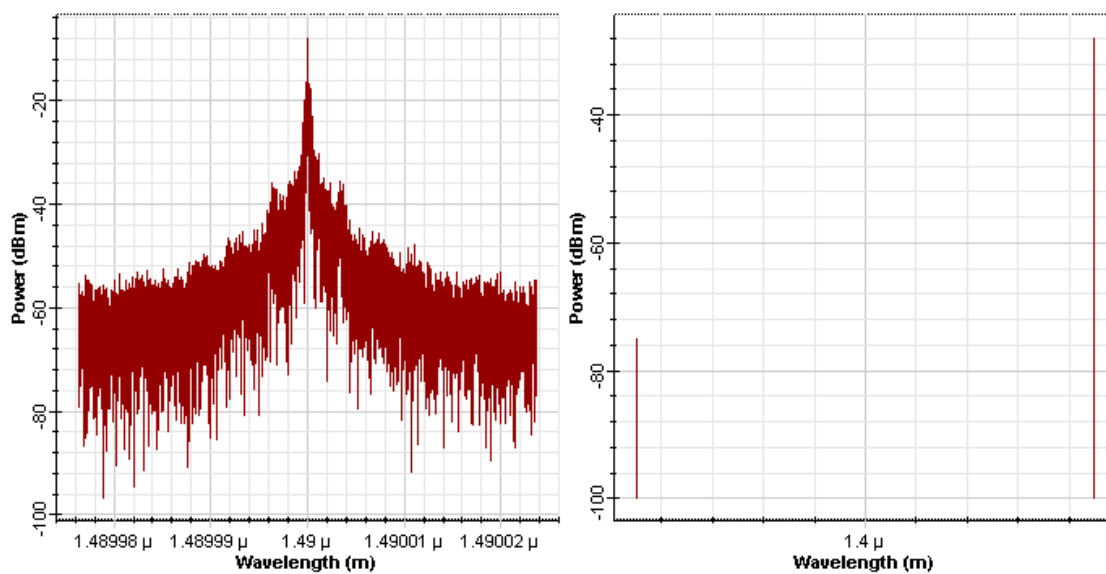
Místo měření	Výkon v místě měření [dBm]
Za zdrojem záření	2,009
Za optickým vláknem (1,8 km)	1,506
Za útlumovým článkem (10x konektor, 8x svár)	-1,574
Za rozbočovačem (1:32)	-18,075

Tab. 10: Průběh útlumu trasou (směr k OLT) pro měření 1.

Místo měření	Výkon v místě měření [dBm]
Za zdrojem záření	-0,998
Za rozbočovačem (1:32)	-17,499
Za útlumovým článkem (10x konektor, 8x svár)	-20,576
Za optickým vláknem (1,8 km)	-21,082

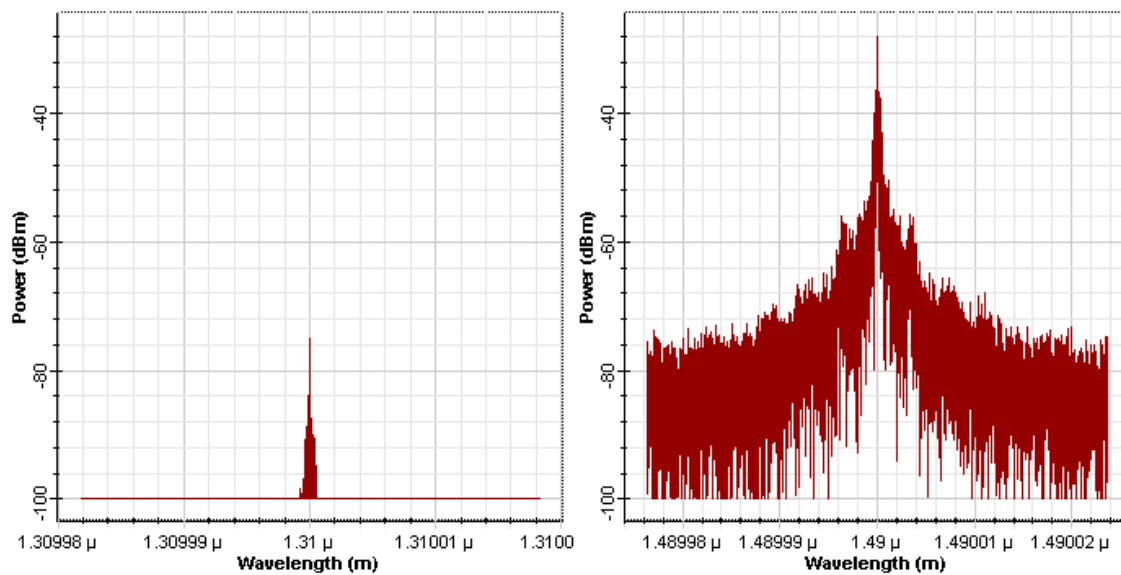
Dalším užitečným měřicím přístrojem je analyzátor optického spektra, který měří výkon v závislosti na vlnové délce. Na obr. 37 vidíme dvě takováto spektra. Prvním je výstup z OLT, druhým je spektrum těsně před ONU detektorem. U přijatého signálu vidíme dvě různá spektra na dvou vlnových délkách. První spektrum na vlnové délce 1310 nm s minimálním výkonem (-70 dBm). Jedná se tedy o odražený signál ze zdroje ONU, druhé při vlnové délce 1310 nm, což je signál z OLT utlumený trasou (viz. obr. 38).

### Optical Spectrum Analyzer



Obr. 36: Spektrum vyslaného a přijatého signálu.

### Optical Spectrum Analyzer

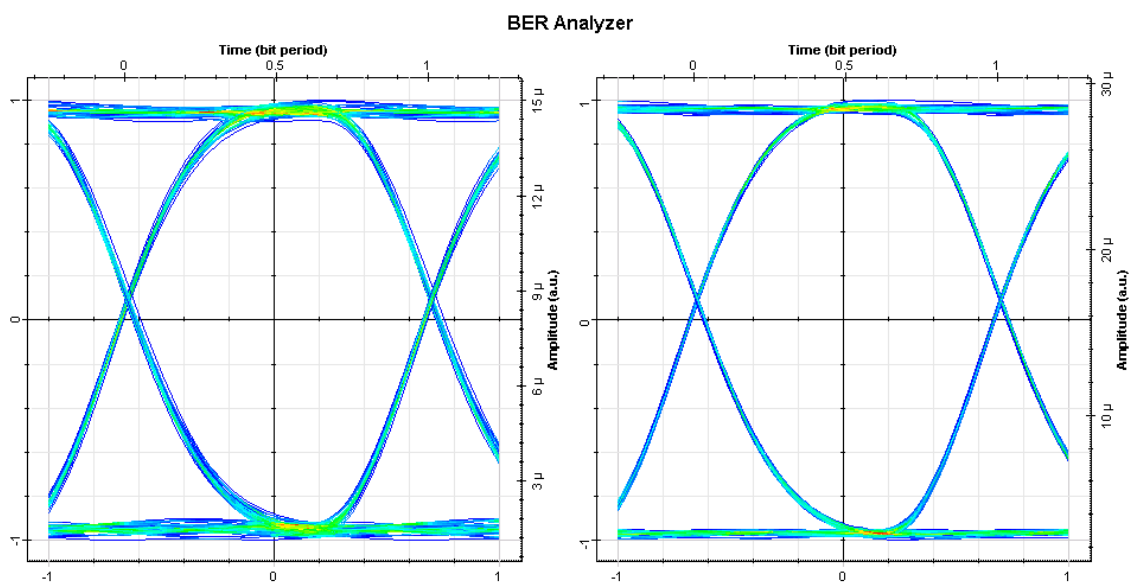


Obr. 37: Spektrum přijatého signálu (1310 nm a 1490 nm).



BER analyzátor vykresluje „oko diagram“ a určuje nám hodnotu chybovosti. Otevřenost oka diagramu vizuálně říká, jak kvalitní je signál na výstupu. Platí čím otevřenější tím lepší. Šířka oka určuje časovou oblast výška zase amplitudu. Dle šířky kontur oka odečítáme kolísání zpoždění.

Obr. 39, tedy strana ONU a OLT jednotky. U OLT je signál s větší chybovostí, což je způsobeno nižším výkonem ONU. Tento nedostatek je kompenzován větší citlivostí OLT detektoru. Toto jsou výstupy pro měření č. 1, takovéto výstupy jsou uvedeny pro zbytek měření v příloze.



Obr. 38: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.

#### 6.4 Měření RFC 2544

Jak je již zmíněno výše měření bylo prováděno pomocí měřicího systému zobrazeného na obrázku 18. Pomocí měřicího přístroje EXFO ASX-200/850 testujeme fyzické vlastnosti sítě. Výsledek jednoho takového testu pro měření 1 je uveden v tab. 11, zbytek měření je uvedeno v příloze.

Tab. 11: Test RFC 2544 (Měření 1).

Velikost rámce [Byte]	Propustnost [Mb/s]	Back-to-back [Mb/s]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
64	84	28,141	1,551	0,61453
128	100	49,12	0	5,86419
256	100	85,76	0	1,52103
512	84,578	100	0	0,63456
1024	100	100	0,117	4,69087
1280	91,937	100	0,073	0,6778
1518	99,034	100	0,247	0,69903

## 7. Závěr

Tato práce je věnována problematice optických přístupových sítí (Fttx). Blíže se zaměřuje na oblast pasivních optických sítí, konkrétně pak na oblast ethernetové PON. Oblast pasivních optických sítí jak celosvětově, tak republikově, je jednou z nejnovějších technologií a je s ní v budoucnosti počítáno. Předpokládá se, že by měla nahradit většinu metalického vedení, tudíž dosáhnout s optickým vláknem co nejbližší k zákazníkovi. Technologie optických sítí má teoretický mezník pouze v rychlosti světla, což je nejrychlejší veličina, kterou známe. Samozřejmě se této rychlosti nedá dosáhnout, protože musíme brát v potaz útlum vlákna prvků, výkony zdrojů a samozřejmě ekonomickou stránku.

Kromě uvedení do problematiky pasivních optických sítí a jejich typů jsme se seznámili s topologiemi sítí a teoretickým návrhem sítí založené na technologii EPON. Takovýto návrh je modelově ukázán na třech teoretických situacích. Jsou to situace FTTH, FTTB a FTTO, u kterých je návrh pouze teoretický a nepočítá s konkrétními parametry budované sítě. Je zde určena hrubá vzdálenost nejzazšího účastníka pouze podle typických hodnot útlumu. Tyto návrhy slouží pouze pro orientaci v problematice a návrhem komplexnějšího charakteru blízkého k praxi se práce zabývá dále.

Praktická část se zabývá komplexním návrhem EPON sítě, s přihlédnutím k reálným hodnotám. Návrh je proveden v programovém prostředí Optisystem a porovnán s reálným měřením v laboratoři. Výsledky tohoto měření (viz. tab. 8) se dle očekávání liší. Protože v simulaci je počítáno s typickými hodnotami prvků, s minimálním výkonem vysílače a citlivostí přijímače, oproti tomu reálný návrh v laboratoři pracuje s daleko příznivějšími hodnotami.

Tento rozdíl čítající v případě měření číslo deset 5,63 dB je dán především útlumy spojek a výkonem vysílače. Díky rozdílu útlumů při měření a simulaci máme také rozdílné výsledky z hlediska rozhodnutí, zda daný systém bude či nebude fungovat. Podle katalogových hodnot, sedm ze čtrnácti simulací nebude fungovat, ovšem dle tabulky vidíme, že v šesti případech dané zapojení v reálných podmínkách funguje. Zároveň v případě určení maximálního možného útlumu pro trasu docházíme k číslu -29,4 dBm, které se v tabulce nachází v oranžovém rámečku. Tyto čísla odpovídají hodnotám, kdy by mělo dojít k ukončení komunikace mezi OLT a ONU avšak není tomu tak. Pouze v měření osm dochází k nefunkčnosti jak simulovaného, tak reálného zapojení.

Dále je v tab. 6 uveden průměrný útlum rozbočovačů. Tyto hodnoty, především u dělicího poměru 1:4 a 1:2, jsou dosti zkreslené. Jedná se o to, že v racku byly zapojeny zřejmě chybně některé větve, proto bylo velice důležité, na který výstup byl konektor zrovna zapojen (byly využívány první výstupy). Proto je uvedeno celé měření přímou metodou v příloze.

Dalším bodem v měření je test RFC 2544, na něm je ověřeno, zda daná síť je schopná provozu. V tomto testu se jako nejhorší pro přenos jeví nízké velikosti rámců. Tento jev je předpokládatelný, jelikož v každém rámci nejsou pouze data (synchronizace, mezera mezi rámci, atd.). To znamená, že při velikosti rámce 64 byte nám při rychlosti 100 Mbit/s projde sítí za sekundu 148 809 rámců. V tomto případě nám část rychlosti nejde na informační data, ale na data ostatní. Toto se samozřejmě děje u jakékoliv délky rámce, ovšem u menších rámců je to znatelnější. Měřicí systém vykazuje různé odchylky od předpokládaných hodnot, což může být způsobeno synchronizací, komunikací mezi měřicím přístrojem a loopback jednotkou anebo čtyřnásobným přechodem z metalického na optické vedení.

Tato práce je náhledem do problematiky simulace oproti reálnému zapojení. Porovnání je velice důležité, protože před každou výstavbou je nejprve nutné provést návrh a simulace před zahájením stavby. Z dosažených výsledků je patrné, že některé parametry jsou předimenzované a že je možnost počítat s lepšími. Ovšem je zde hledisko stárnutí, které je v návrhu nutné zohlednit a přitom v měřeních zohledněno z pochopitelných důvodů není. Proto je možné, že z přibývajícím dobou by se simulace více a více blížily reálu.

Laboratoř, ve které bylo měření prováděno, byla uvedena do provozu tento rok a pracoviště využitě v této práci je nyní používáno k výuce. Dále zde probíhají další diplomové a bakalářské práce zabývající se jak problematikou EPON tak WDM PON. Z hlediska technologií se jedná o trend využitelný v dalším profesním životě.

## Seznam literatury

- [1] Accedian Networks Inc. (2008). EtherNID™ Administrator's Guide. Québec, Canada.
- [2] Agilent Technologies. (15. Listopad 2004). RFC 2544 Testing of Ethernet Services in Telecom Networks. Načteno z <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-1927EN.pdf>
- [3] Allied Telesis. (2009). iMap User Guide Release 12.0.
- [4] Dhaini, A. (2008). *Next-Generation Passive Optical Networks*. Saarbrücken, Germany: Vdm Verlag.
- [5] EXFO Electro-Optical Engineering. (2010). *AXS-200/850 Ethernet Test Set*. Načteno z [www.EXFO.com](http://www.EXFO.com): <http://documents.exfo.com/specsheets/AXS-200-850-angHR.pdf>
- [6] Firerxon. (2006). SC Receptacle SFP with Spring-latch GE-PON OLT Transceiver. U.S.A.
- [7] Glen Kramer, B. M. (nedatováno). *Ethernet Passive Optical Network*. Israel, USA.
- [8] Keiser, G. (2006). *FTTX Concepts and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sonc, Inc.
- [9] KEYMILE GmbH. (2009). *Ethernet Point-to-Point vs. PON*. Hanover, Germany.
- [10] Kramer, G. (2005). *Ethernet Passive Optical Network*. New York: The MxGraw-Hill Companies, Inc.
- [11] Lafata, P. (2009). *Metody měření útlumu optického vlákna: Pasivní optické přístupové sítě*. Praha, Česká Republika.
- [12] Lafata, P. (2009). *Pasivní optická přístupová síť EPON*. Praha, Česká Republika.
- [13] Lem, C. (2007). *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Inc.
- [14] Optiwave. (2008). *OptiSystem 7.0: TUTORIALS- VOLUME I*. Ottawa, Ontario, Canada: Optiwave.

- [15] Optiwave. (2008). *OptiSystem 7.0: Tutorials- Volume 2*. Ottawa, Ontario, Canada: Optiwave.
- [16] Petrželka, R. (nedatováno). Allied Telesis řešení pro EPON.
- [17] SQS vláknová optika. (11. Prosinec 2010). 1xN, 2xN PLC Splitters. Nová Paka, Czech Republic.
- [18] Šíma, J. (nedatováno). Optimalizace návrhu FTTH v sítích PON a PtP. Praha.
- [19] TELNET Redes Inteligentes. (2011). *Single-mode Optical Fiber G.652.D*. Získáno 27. Březen 2011, z Telnet - Redes inteligentes: Inicio: <http://www.telnet-ri.es/en/products/fiber-optic-cables-and-passive-components/optical-fiber/single-mode-optical-fiber-g652d/>
- [20] Vašínek, V. (nedatováno). Přednášky z předmětu optoelektronika I. II. III. Ostrava.
- [21] Vodrážka, J., Lafata, P., & Schlitter, P. (nedatováno). *Optické sítě*. Získáno 27. Březen 2011, z Access server: <http://access.feld.cvut.cz/search.php?rsvelikost=sab&rstext=all-phpRS-all&rstema=27&stromhlmenu=11>

## Seznam zkratek

AON	Active optical network
APON	ATM passive optical network
ATM	Asynchronous transfer mode
BER	Bit error rate
BPON	Broadband passive optical network
CAD	Computer-aided design
CWDM	Coarse wavelength division multiplexing
DWDM	Dense wavelength division multiplexing
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
EPON	Ethernet passive optical network
FDM	Frequency division multiplex
FP	Fabry–Pérot resonator
FTTB	Fiber to the building
FTTCab	Fiber to the cabine
FTTC	Fiber to the curi
FTTH	Fiber to the home
FTTN	Fiber to the node
FTTO	Fiber to the office
FTTP	Fiber to the premises
GEM	GPON encapsulation method
GEPON	Gigabit ethernet passive optical network
GPON	Gigabit passive optical network
HEC	Header error detection and correction
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation

LD	Laser diod
LED	Light emitting diod
MM	Multi-mode optical fiber
MFD	Mode field diameter
ODN	Optical distribution network
OLT	Optical line termination.
OMCI	ONU management and control interface
ONT	Optical network termination
ONU	Optical network unit
OTDR	Optical time domain reflektometry
PLI	Payload length indicator
PMD	Polarization mode dispersion
PON	Passive optical network
PORT ID	Port identificator
PTI	Payload type indicator
P-to-MP	Point-to-multipoint
P-to-P	Point-to-point
RX	Reciver
SDH	Synchronous digital hierarchy
SFP	Small form factor pluggable
SM	Single-mode optical fiber
TDM	Time division multiplex
TX	Transiver
VCSEL	Vertical-cavity surface-emitting laser
WDM	Wavelength division multiplex
xDSL	x digital subscriber line



## **Seznam příloh**

- A.** Měření rozbočovačů přímou metodou.
- B.** Výstupy testu RFC 2544.
- C.** Profil měřených tras pomocí OTDR.
- D.** Oko diagram z BER analyzátoru (OptiSystem).

## Příloha A

*Tabulka útlumu pro porty rozbočovače 1:32.*

Port	Útlum [dB] 1310 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1310 nm (směr 2)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 2)
1	16,15	16,13	16,19	16,13
2	16,12	16,12	16,17	16,15
3	16,37	16,29	16,39	16,29
4	16,32	16,19	16,34	16,20
5	16,44	16,10	16,47	16,11
6	16,12	16,05	16,15	16,04
7	16,39	16,00	16,47	16,02
8	16,58	16,52	16,58	16,49
9	16,22	16,16	16,19	16,13
10	16,27	16,14	16,27	16,13
11	16,34	16,13	16,34	16,13
12	16,44	16,31	16,42	16,28
13	16,50	16,14	16,47	16,06
14	16,32	16,15	16,29	16,08
15	16,37	16,13	16,37	16,06

*Tabulka útlumu pro porty rozbočovače 1:7.*

Port	Útlum [dB] 1310 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1310 nm (směr 2)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 2)
1	8,70	8,76	8,62	8,79
2	9,33	9,65	9,28	9,53
3	8,74	9,14	8,66	9,05
4	8,85	8,80	8,86	8,92
5	9,26	8,41	9,14	8,48
6	8,77	8,72	8,82	8,52

7	8,90	8,63	8,85	8,69
---	------	------	------	------

*Tabulka útlumu pro porty rozbočovače 1:4.*

Port	Útlum [dB] 1310 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1310 nm (směr 2)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 2)
1	6,66	6,89	6,72	6,85
2	4,27	4,42	4,24	4,14
3	9,03	9,17	9,06	9,19
4	8,70	8,45	8,86	8,41

*Tabulka útlumu pro porty rozbočovače 1:3.*

Port	Útlum [dB] 1310 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1310 nm (směr 2)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 2)
1	5,67	6,67	5,81	6,67
2	6,38	6,60	6,56	6,72
3	4,31	4,97	4,39	5,14

*Tabulka útlumu pro porty rozbočovače 1:2.*

Port	Útlum [dB] 1310 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1310 nm (směr 2)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 2)
1	1,81	1,77	1,7	1,48
2	11,49	13,64	11,9	10,88

*Tabulka útlumu pro porty rozbočovače 1:2.*

Port	Útlum [dB] 1310 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 1)	Útlum [dB] 1310 nm (směr 2)	Útlum [dB] 1550 nm (směr 2)
1	2,27	2,19	2,23	2,07
2	5,92	5,94	5,83	5,96

## Příloha B

### Test RFC 2544 měření 1.

Velikost rámce [Byte]	Propustnost [Mb/s]	Back-to-back [Mb/s]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
64	84	28,141	1,551	0,61453
128	100	49,12	0	5,86419
256	100	85,76	0	1,52103
512	84,578	100	0	0,63456
1024	100	100	0,117	4,69087
1280	91,937	100	0,073	0,6778
1518	99,034	100	0,247	0,69903

### Test RFC 2544 měření 2.

Velikost rámce [Byte]	Propustnost [Mb/s]	Back-to-back [Mb/s]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
64	96,551	28,965	2,385	2,88228
128	100	57,428	0,345	9,00761
256	98,571	84,96	0.029	0,62556
512	91,252	100	0	0,62159
1024	100	37,082	0,318	4,7902
1280	92,526	100	0	0,64961
1518	99,034	100	0	0,71606

### Test RFC 2544 měření 3.

Velikost rámce [Byte]	Propustnost [Mb/s]	Back-to-back [Mb/s]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
64	97,674	21,674	2,098	6,34884
128	98,013	57,814	0,082	0,62819
256	97,526	97,851	0	0,62896
512	100	100	0	1,21912
1024	99,051	100	0	0,66788

1280	88,255	100	0,198	0,63922
1518	99,546	43,445	0	1,33581

*Test RFC 2544 měření 4.*

<b>Velikost rámce [Byte]</b>	<b>Propustnost [Mb/s]</b>	<b>Back-to-back [Mb/s]</b>	<b>Ztrátovost [%]</b>	<b>Zpoždění [ms]</b>
64	97,674	18,969	1,822	8,87358
128	100	44,558	0	5,52592
256	99,28	92,754	0	1,2841
512	91,882	56,557	0,03	0,59505
1024	97,026	98,084	0,251	0,65872
1280	90,027	98,462	0,177	0,64585
1518	93,268	78,802	0,111	0,67126

*Test RFC 2544 měření 5.*

<b>Velikost rámce [Byte]</b>	<b>Propustnost [Mb/s]</b>	<b>Back-to-back [Mb/s]</b>	<b>Ztrátovost [%]</b>	<b>Zpoždění [ms]</b>
64	74,418	22,014	2,461	6,15244
128	86,486	44,659	0	7,60627
256	92,753	92,754	0	2,67412
512	95,88	96,241	0	0,63456
1024	98,084	98,084	0	2,799
1280	88,033	98,462	0,167	0,63027
1518	90,089	98,7	0	0,66915

*Test RFC 2544 měření 6.*

<b>Velikost rámce [Byte]</b>	<b>Propustnost [Mb/s]</b>	<b>Back-to-back [Mb/s]</b>	<b>Ztrátovost [%]</b>	<b>Zpoždění [ms]</b>
64	71,111	19,484	1,84	0,61679
128	86,486	41,887	0	8,11193
256	91,428	92,754	0,142	0,62628
512	88,888	96,241	0	0,62962

1024	98,084	98,084	0	4,97734
1280	98,461	98,462	0	3,25424
1518	89,61	62,434	0	0,65042

*Test RFC 2544 měření 7.*

Velikost rámce [Byte]	Propustnost [Mb/s]	Back-to-back [Mb/s]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
64	68,817	20,926	1,643	0,60255
128	85,906	10,589	0,105	3,89701
256	90,459	92,754	0	0,62988
512	95,88	44,939	0	1,18188
1024	97,616	61,143	0	0,88434
1280	86,779	5,299	0,136	0,65671
1518	98,699	98,7	0	2,06364

*Test RFC 2544 měření 8 již neproběhlo z důvodu ztráty konektivity (příliš velký útlum, téměř 36dB).*

Velikost rámce [Byte]	Propustnost [Mb/s]	Back-to-back [Mb/s]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
0	0	0	0	0

*Test RFC 2544 měření 9.*

Velikost rámce [Byte]	Propustnost [Mb/s]	Back-to-back [Mb/s]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
64	68,817	22,659	1,77	0,61268
128	86,486	47,764	0	5,90303
256	92,753	92,754	0	1,7236
512	75,851	49,379	0	0,59587
1024	98,084	98,084	0,109	4,583
1280	78,191	73,691	0	0,70496
1518	75,937	98,7	0	0,57779

*Test RFC 2544 měření 10.*

Velikost rámce [Byte]	Propustnost [Mb/s]	Back-to-back [Mb/s]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
64	74,418	20,932	2,192	2,47302
128	81,012	45,893	0	0,50617
256	91,103	92,754	0	0,618
512	95,88	96,241	0	2,35868
1024	72,986	98,084	0,151	0,66134
1280	97,859	81,325	0	0,74271
1518	77,886	70,92	0	0,61117

*Test RFC 2544 měření 11.*

Velikost rámce [Byte]	Propustnost [Mb/s]	Back-to-back [Mb/s]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
64	74,418	19,558	1,748	7,25563
128	86,486	46,476	0,162	5,60427
256	82,58	92,754	0	0,63117
512	96,24	96,241	0	4,91331
1024	90,14	26,865	0	0,64822
1280	91,756	58,26	0	0,65311
1518	98,699	98,7	0,185	5,05408

*Test RFC 2544 měření 12.*

Velikost rámce [Byte]	Propustnost [Mb/s]	Back-to-back [Mb/s]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
64	74,418	21,164	1,961	7,31093
128	86,486	43,894	0	5,06481
256	82,58	57,97	0	0,60339
512	96,24	96,241	0	4,70024
1024	81,076	58,092	0	0,59462
1280	89,887	98,462	0	0,64349
1518	77,886	98,7	0	0,59914

*Test RFC 2544 měření 13.*

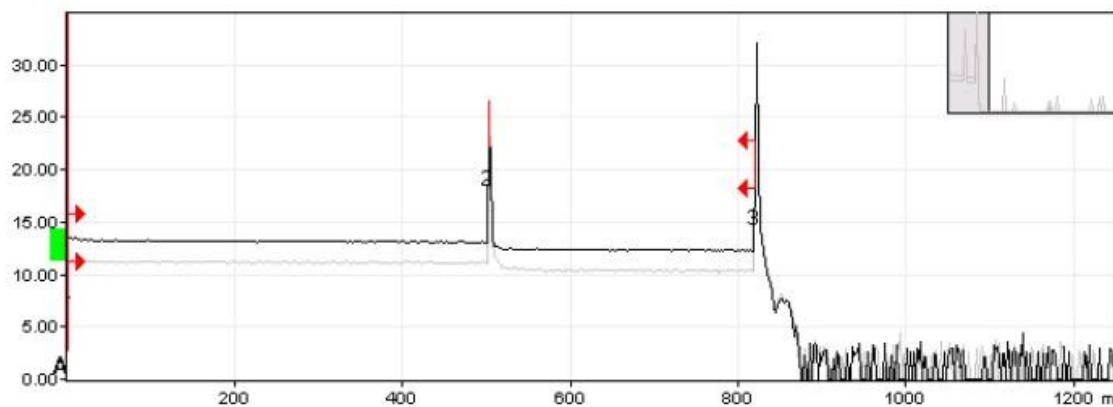
<b>Velikost rámce [Byte]</b>	<b>Propustnost [Mb/s]</b>	<b>Back-to-back [Mb/s]</b>	<b>Ztrátovost [%]</b>	<b>Zpoždění [ms]</b>
64	74,418	20,168	1,755	5,92189
128	86,486	43,909	0	11,56353
256	71,309	92,754	0	0,58209
512	96,24	96,241	0,201	4,41557
1024	92,086	98,084	0	0,66319
1280	98,461	66,411	0	1,18911
1518	83,315	98,7	0,087	0,58396

*Test RFC 2544 měření 14.*

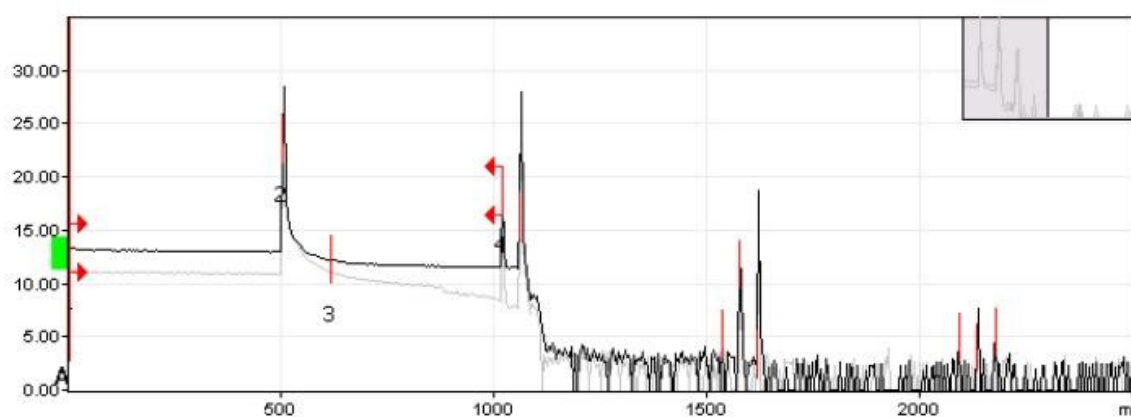
<b>Velikost rámce [Byte]</b>	<b>Propustnost [Mb/s]</b>	<b>Back-to-back [Mb/s]</b>	<b>Ztrátovost [%]</b>	<b>Zpoždění [ms]</b>
64	73,563	21,439	1,694	0,61571
128	66,666	45,426	0	0,56764
256	92,753	92,754	0,111	4,63024
512	93,944	96,241	0,128	0,62344
1024	98,084	98,084	0,218	2,09843
1280	83,116	98,462	0	0,61766
1518	97,245	98,7	0	0,68926



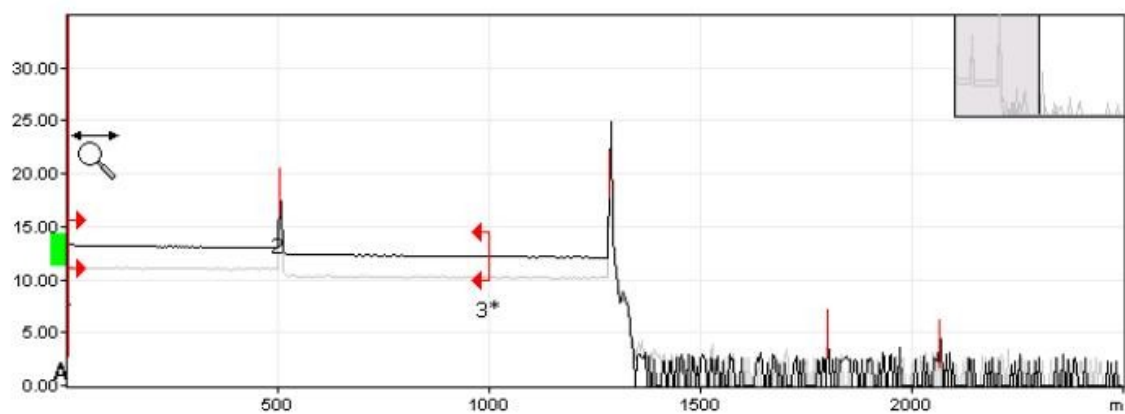
## Příloha C



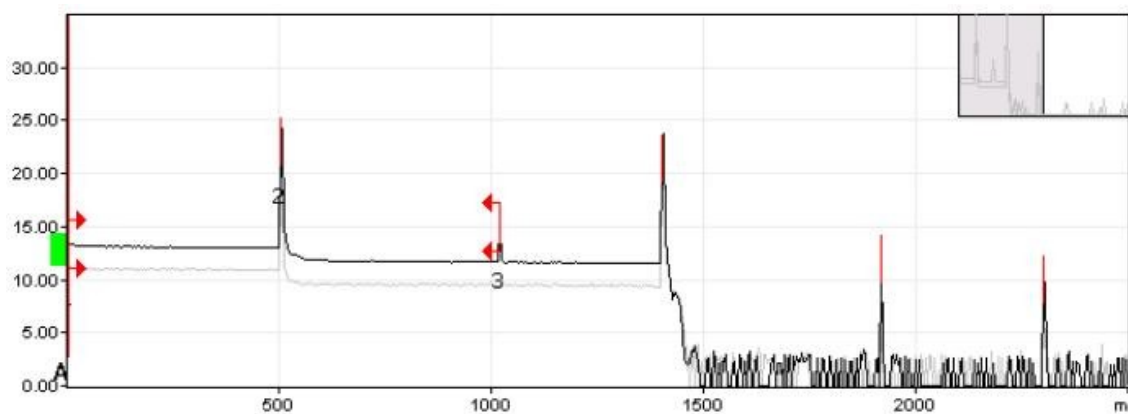
Měřená trasa 300m pomocí OTDR.



Měřená trasa 500m pomocí OTDR.

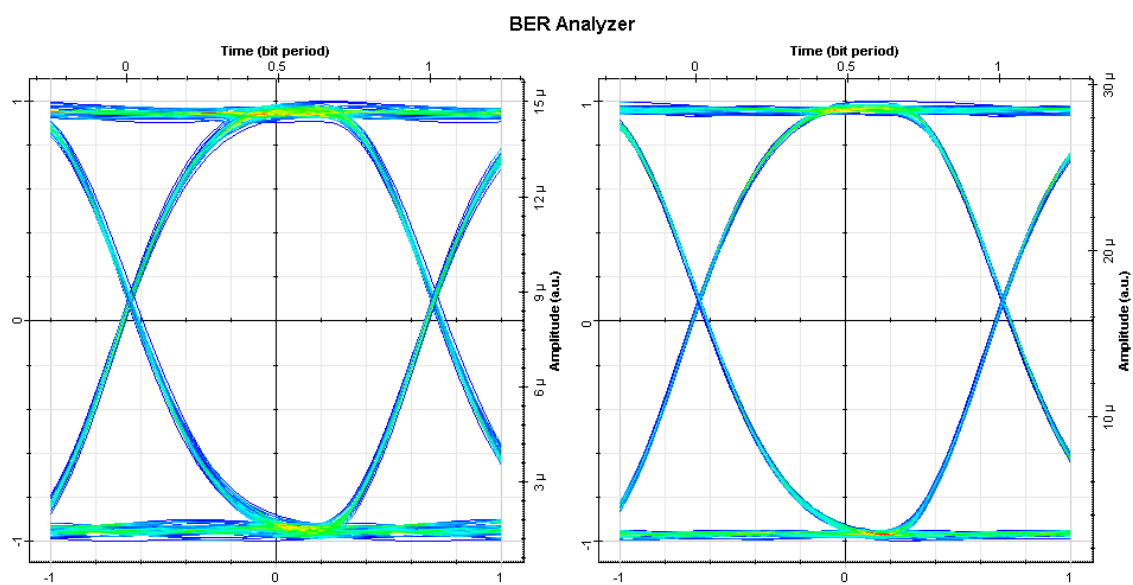


Měřená trasa 750m pomocí OTDR.



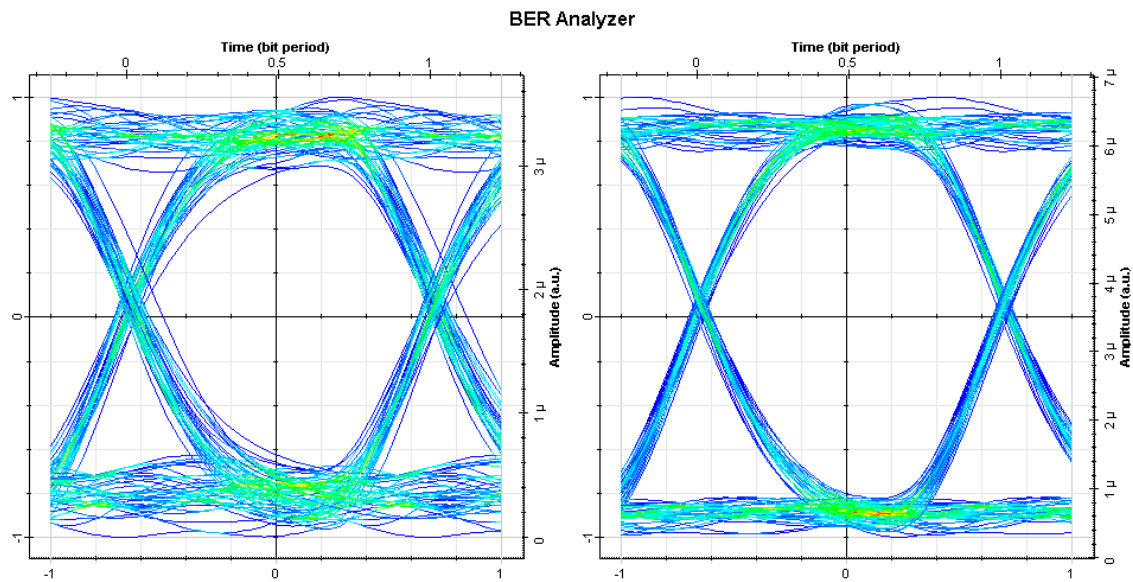
Měřená trasa 1000m pomocí OTDR.

## Příloha D



Měření 1: a) detektor u OLT.

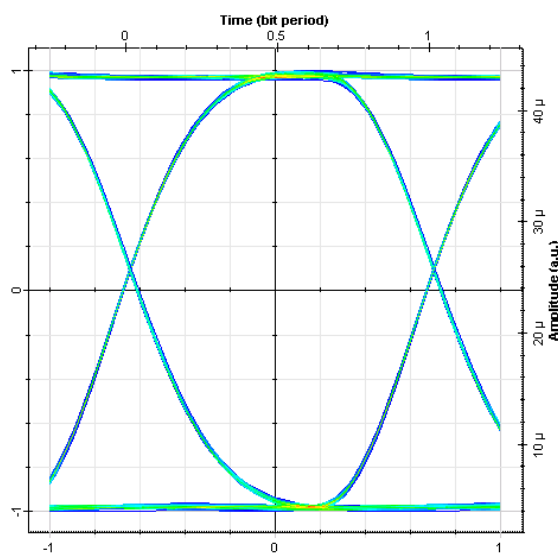
b) detektor u ONU.



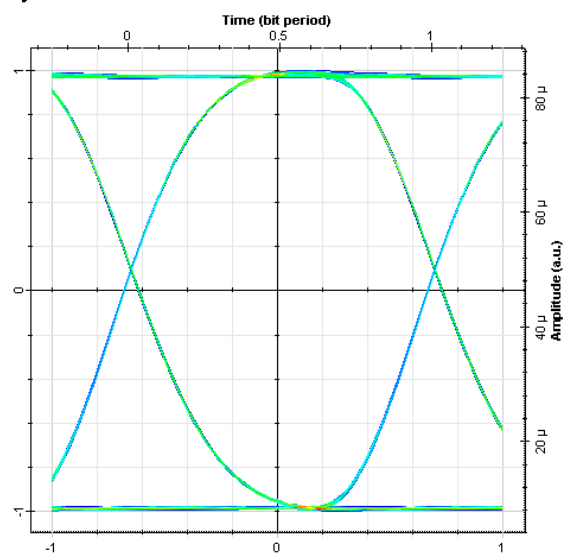
Měření 2: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.

### BER Analyzer

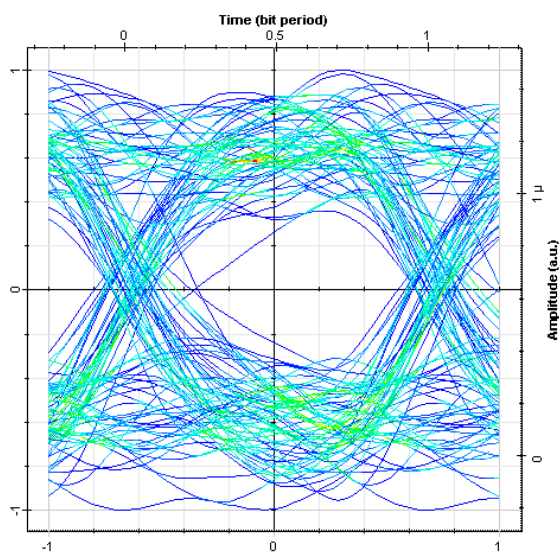


Měření 3: a) detektor u OLT.

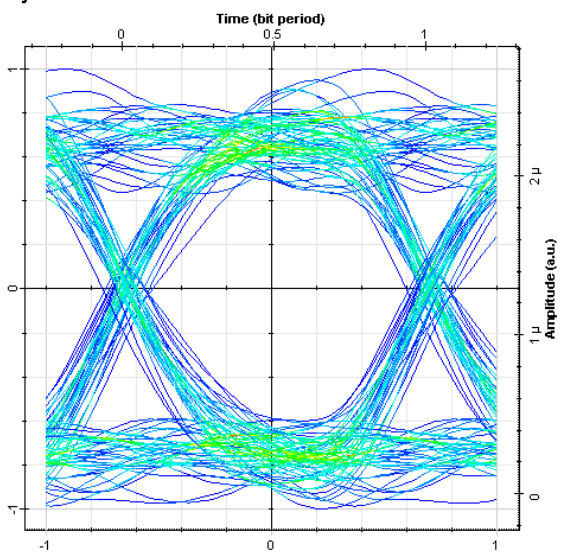


b) detektor u ONU.

### BER Analyzer

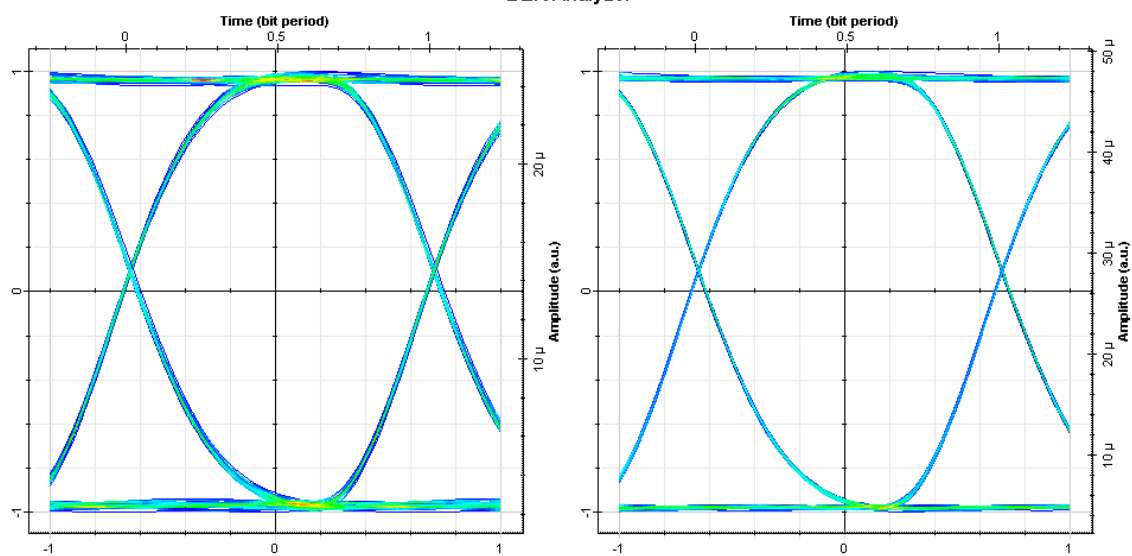


Měření 4: a) detektor u OLT.



b) detektor u ONU.

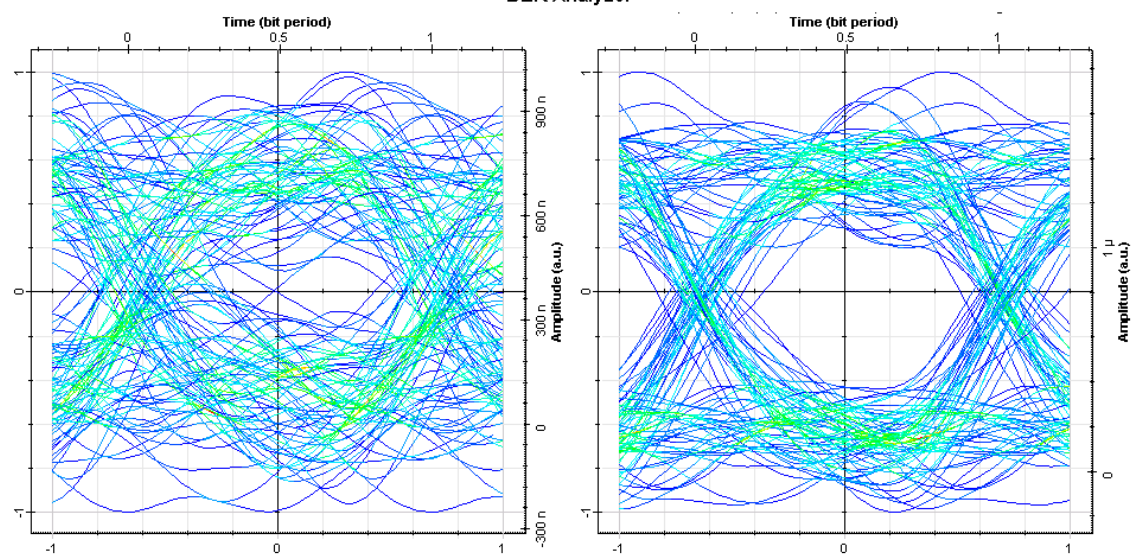
# BER Analyzer



Měření 5: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.

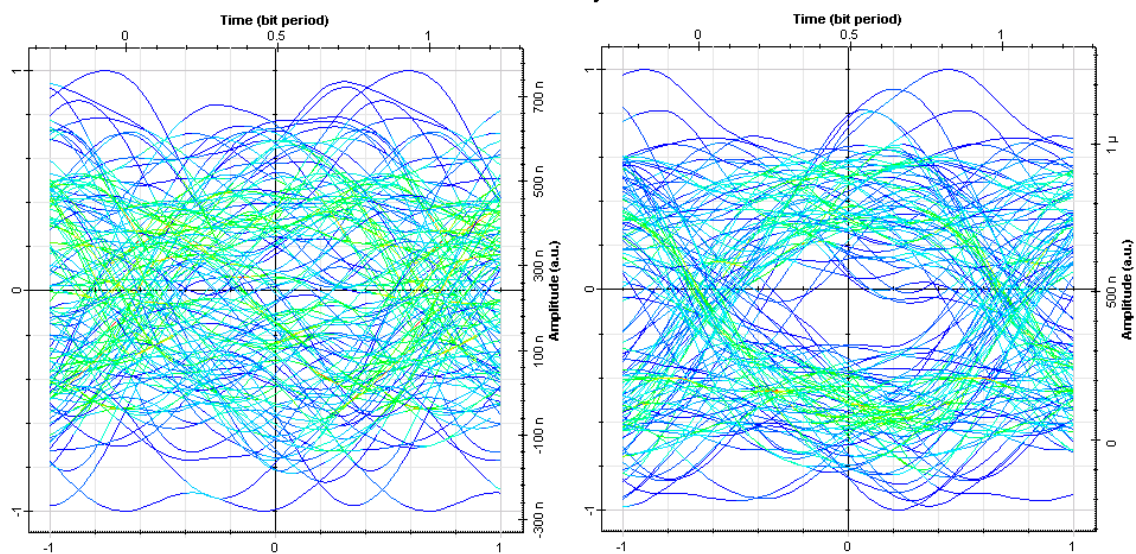
# BER Analyzer



Měření 6: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.

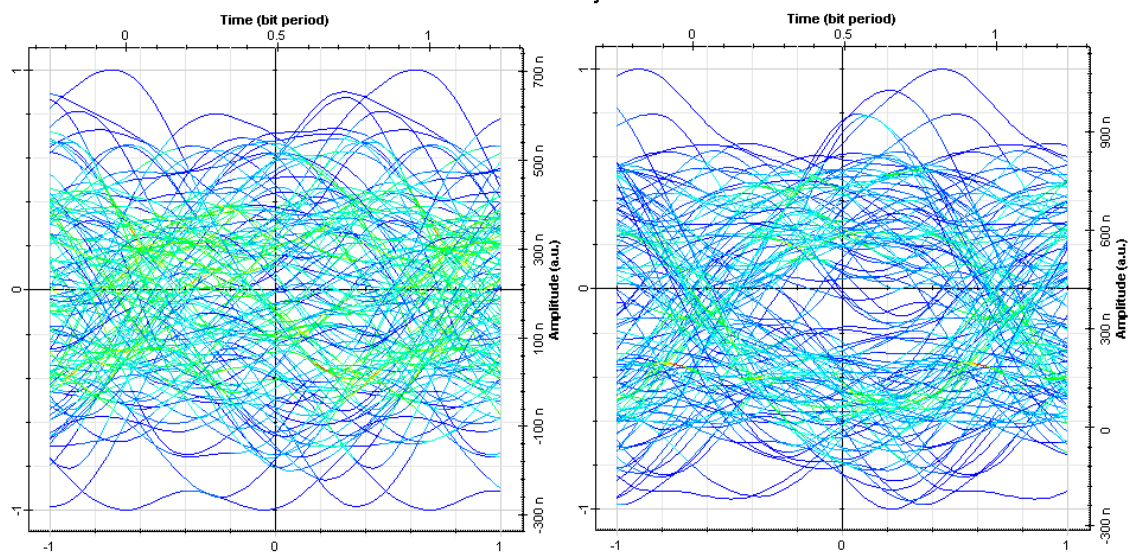
### BER Analyzer



Měření 7: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.

### BER Analyzer

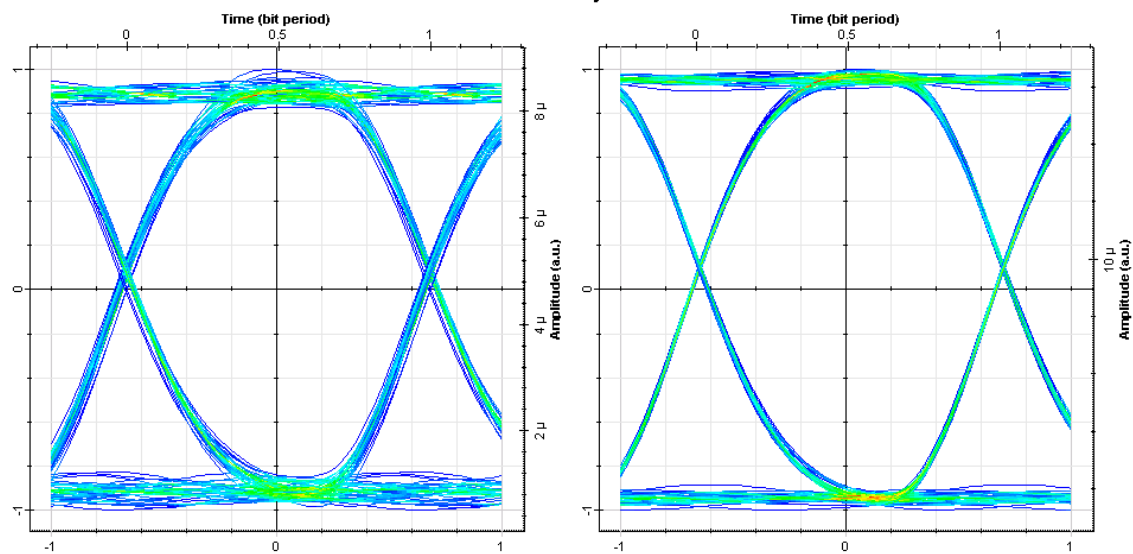


Měření 8: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.



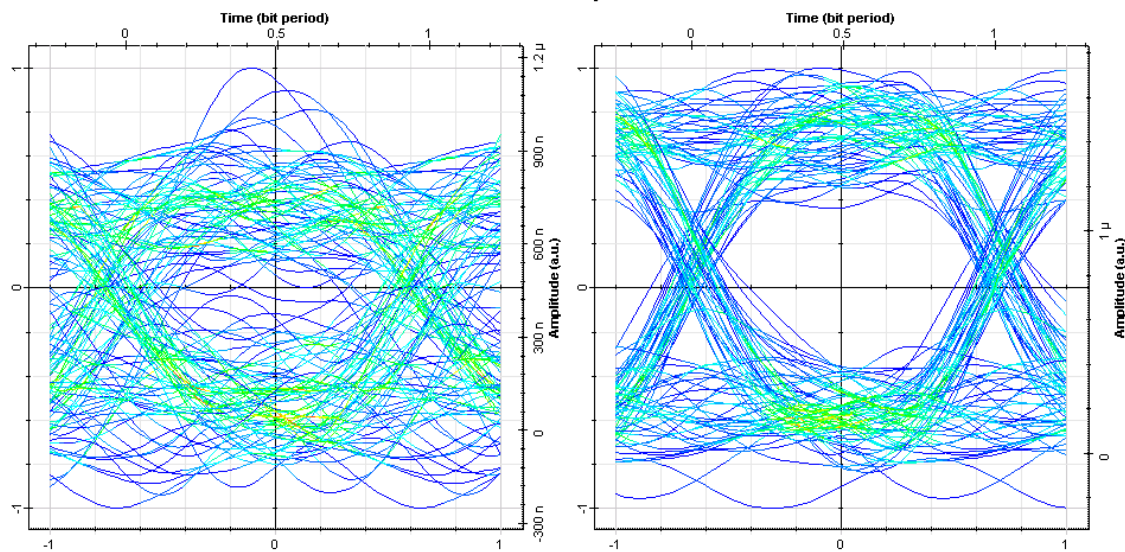
### BER Analyzer



Měření 9: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.

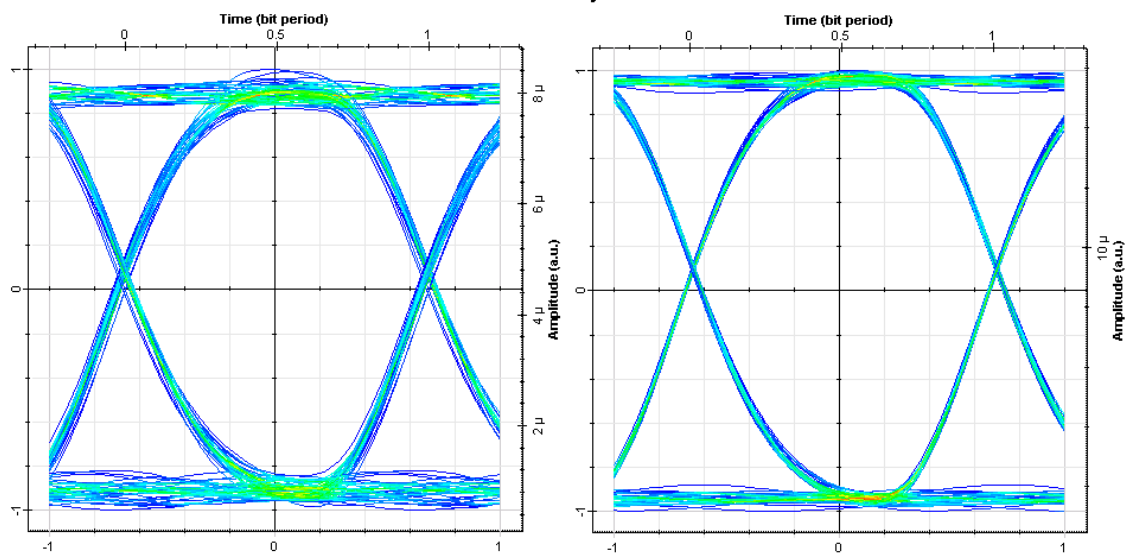
### BER Analyzer



Měření 10: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.

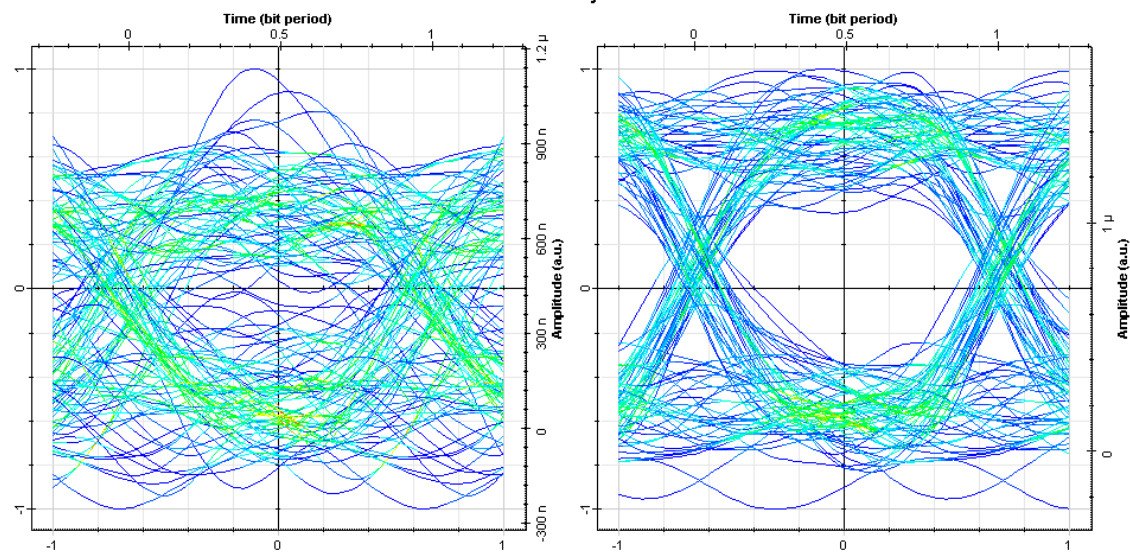
### BER Analyzer



Měření 11: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.

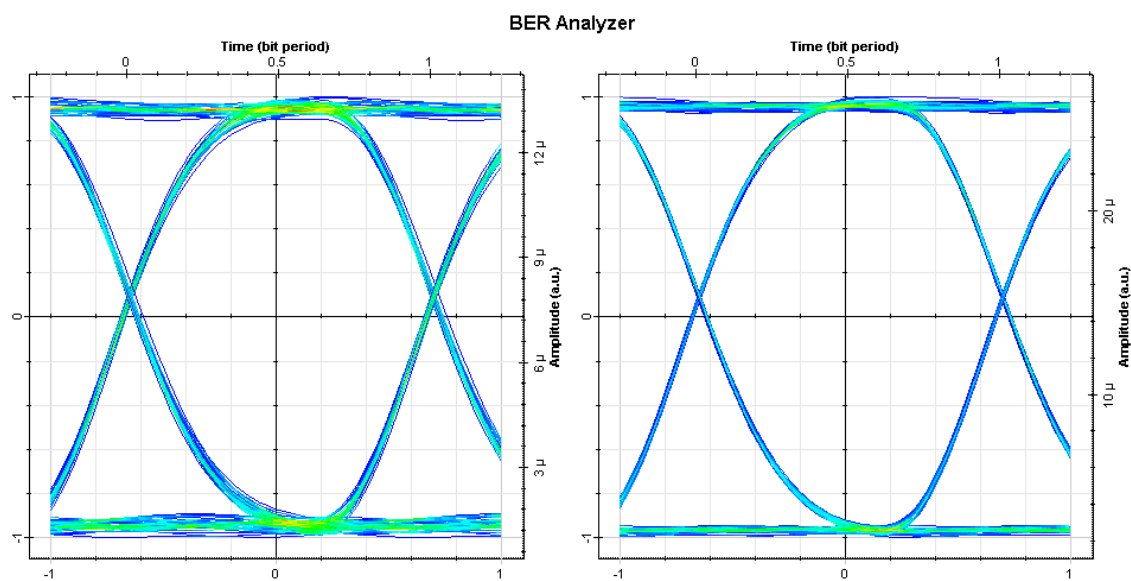
### BER Analyzer



Měření 12: a) detektor u OLT.

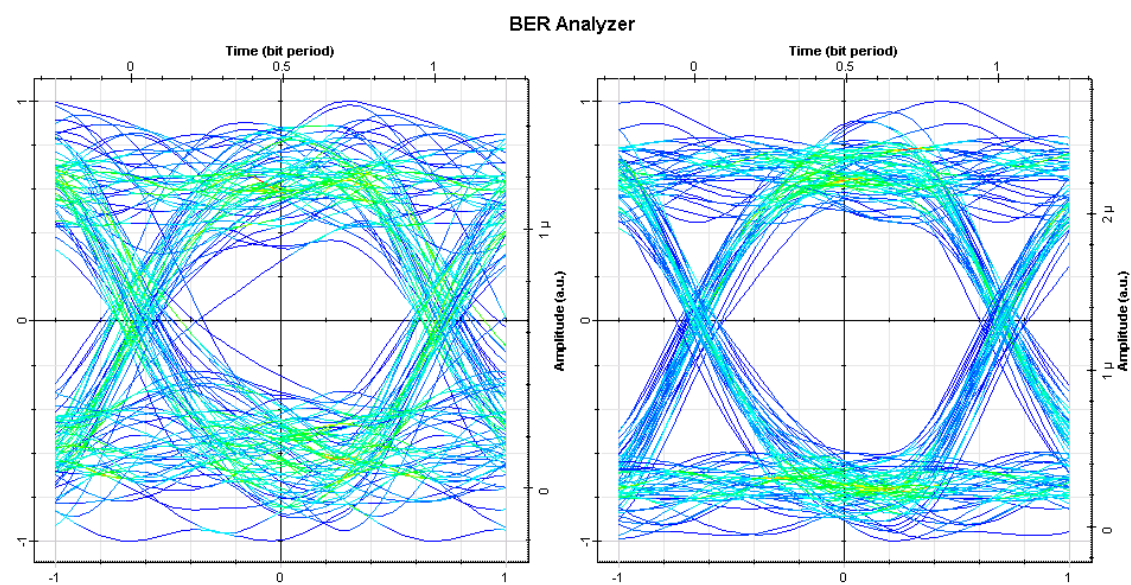
b) detektor u ONU.





Měření 13: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.



Měření 14: a) detektor u OLT.

b) detektor u ONU.